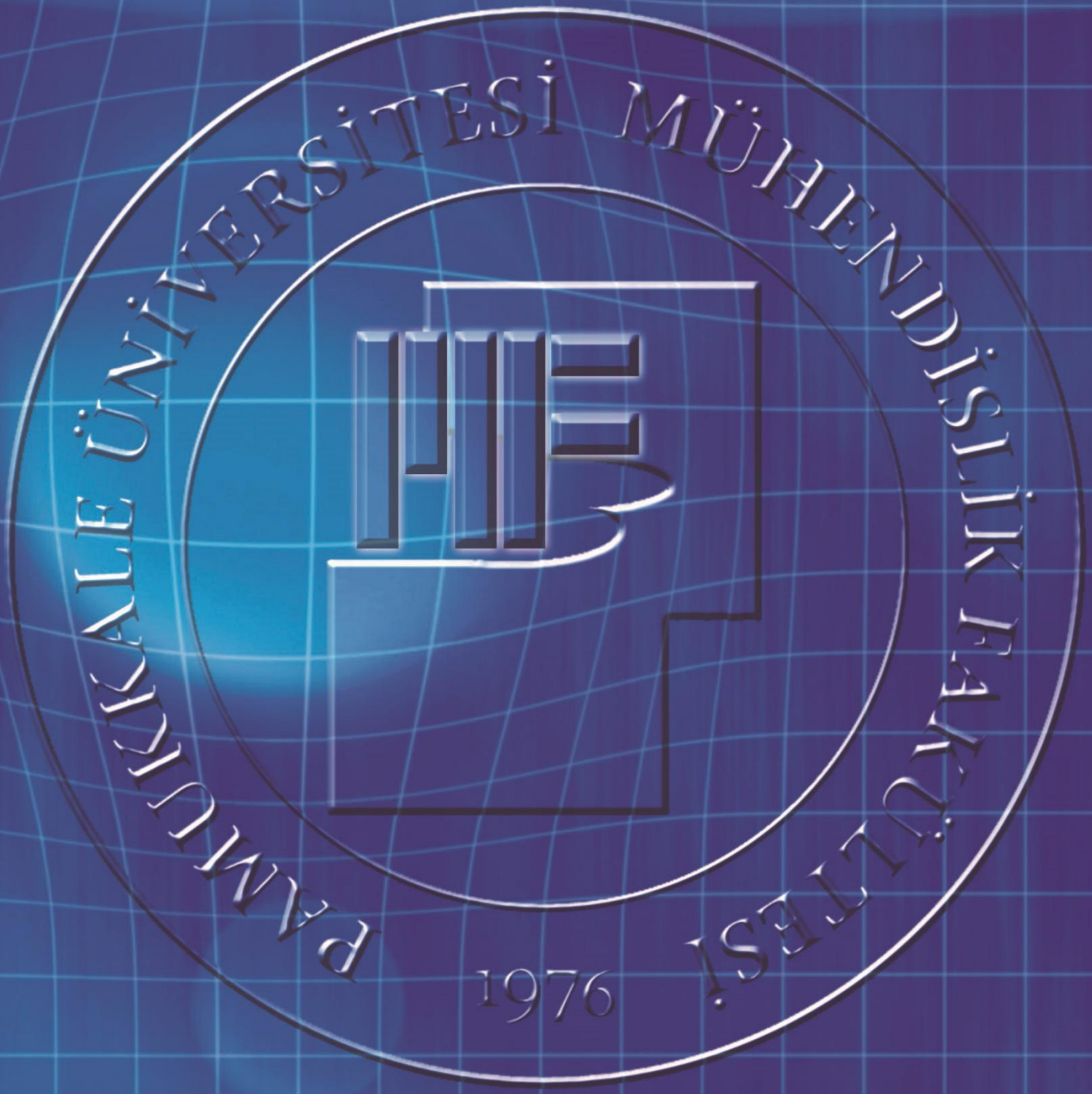
ISSN 2147-5881

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

CİLT/VOL. 31 SAYI/NO. 7 2025



PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ
Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

CİLT/VOL. 31 SAYI/NO. 7 2025 **ISSN 2147-5881**

Sahibi/*Owner*
Mühendislik Fakültesi Adına/*On Behalf of Engineering Faculty*
Dekan/*Dean*
Prof. Dr. Sezai TOKAT

Baş Editör/*Editor-in-Chief*
Prof. Dr. Aydın KIZILKAYA, Pamukkale Üniversitesi, Türkiye.

Yardımcı Editörler/ *Associate Editors*
Dr. Öğr. Üyesi Özge Ersu ÇAKIR, Pamukkale Üniversitesi, Türkiye.
Dr. Öğr. Üyesi Engin NACAROĞLU, Pamukkale Üniversitesi, Türkiye.
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TÜMBEK, Pamukkale Üniversitesi, Türkiye.

Danışma Kurulu/*Editorial Advisory Board*

Prof. Dr. Ahmet Hamdi KAYRAN	İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye *Istanbul Technical University, Turkey*	Prof. Dr. Jamal ROSTAMI	Pennsylvania Eyalet Üniversitesi, ABD *Pennsylvania State University, USA*
Prof. Dr. Ahmet ÜNAL	Reutlingen Üniversitesi, Almanya *Reutlingen University, Germany*	Prof. Dr. Joong Hoon KIM	Kore Üniversitesi, Güney Kore *Korea University, Korea*
Prof. Dr. Akif A. BULGAK	Concordia Üniversitesi, Kanada *Concordia University, Canada*	Prof. Dr. Leszek Adam DOBRZANSKI	Silesian Teknoloji Üniversitesi, Polonya *Silesian University of Technology, Poland*
Prof. Dr. Aydın AKAN	İstanbul Üniversitesi, Türkiye *Istanbul Technical University, Turkey*	Prof. Dr. Mehmet A. OTURAN	Paris-Est Üniversitesi, Fransa *Paris-Est University, France*
Prof. Dr. Aydın BÜYÜKSARAÇ	Bitlis Eren Üniversitesi, Türkiye *Bitlis Eren University, Turkey*	Prof. Dr. Mehmet Bayram YILDIRIM	Wichita Eyalet Üniversitesi, ABD *Wichita State University, USA*
Prof. Dr. Ayşe FİLİBELİ	Dokuz Eylül Üniversitesi, Türkiye *Dokuz Eylul University, Turkey*	Prof. Dr. Muhammad H. RASHID	West Florida Üniversitesi, ABD *University of West Florida, USA*
Prof. Dr. Bimal K. BOSE	Tennessee Üniversitesi, ABD *Tennessee University, USA*	Prof. Dr. Mustafa M. ARAL	Georgia Teknoloji Enstitüsü, ABD *Georgia Institute of Technology, USA*
Prof. Dr. Bülent TOPKAYA	Akdeniz Üniversitesi, Türkiye *Akdeniz University, Turkey*	Prof. Dr. Necati ÇATBAŞ	Central Florida Üniversitesi, ABD *University of Central Florida, USA*
Dr. Can Metehan TURHAN	Friedrich-Alexander Üniversitesi, Almanya *Friedrich-Alexander University, Germany*	Prof. Dr. Onur SAYMAN	Dokuz Eylül Üniversitesi, Türkiye *Dokuz Eylul University, Turkey*
Prof. Dr. Chrissoleon T. PAPADOPOULOS	Selanik Aristotle Üniversitesi, Yunanistan *Aristotle University of Thessaloniki, Greece*	Prof. Dr. Ömer AYDAN	Ryukyu Üniversitesi, Japonya *University of the Ryukyus, Japan*
Prof. Dr. Erhan KOZAN	Queensland Teknoloji Üniversitesi, Avustralya *Queensland University of Technology, Australia*	Prof. Dr. Sibel PAMUKÇU	Lehigh Üniversitesi, ABD *Lehigh University, USA*
Prof. Dr. Erkan TOPAL	Curtin Üniversitesi, Avustralya *Curtin University,Australia*	Prof. Dr. Surendra M. GUPTA	Northeastern Üniversitesi, ABD *Northeastern University, USA*
Prof. Dr. Fakhraddin KADİROV	Azerbeycan Bilimler Akademisi, Azerbaycan *Azerbaijan Academy of Sciences, Azerbaijan*	Prof. Dr. Şenay ŞİMŞEK	Kuzey Dakota Eyalet Üniversitesi, ABD *North Dakota State University, USA*
Prof. Dr. Fikret KARGI	Dokuz Eylül Üniversitesi, Türkiye *Dokuz Eylul University, Turkey*	Prof. Dr. Ümit ÖZGÜR	Virginia Commonwealth Üniversitesi, ABD *Virginia Commonwealth University, USA*
Prof. Dr. Hakan KARSLI	Karadeniz Teknik Üniversitesi, Türkiye *Karadeniz Technical University, Turkey*	Prof. Dr. Xin-She YANG	Middlesex Üniversitesi, İngiltere *Middlesex University, UK*
Prof. Dr. Hans-Otto GUENTHER	Pusan Ulusal Üniversitesi, Güney Kore *Pusan National University, Korea*	Prof. Dr. Yunus Ali ÇENGEL	Adnan Menderes Üniversitesi, Türkiye *Adnan Menderes University, Turkey*
Prof. Dr. Hulusi Bülent ERTAN	Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Türkiye *Middle East Technical University, Turkey*	Prof. Dr. Zekai ŞEN	İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye *Istanbul Technical University, Turkey*
Prof. Dr. İlhami ÇOLAK	Gazi Üniversitesi, Türkiye *Gazi University, Turkey*	Prof. Dr. Zong Woo GEEM	Gachon Üniversitesi, Güney Kore *Gachon University, Korea*
Prof. Dr. İsmail GÜLTEPE	Environment Canada, Kanada *Environment Canada, Canada*		

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ
Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

CİLT/VOL. 31 SAYI/NO. 7 2025 **ISSN 2147-5881**

Editörler Kurulu/ ***Editorial Board***

Prof. Dr. Aydın KIZILKAYA (Baş Editör)	Elektronik Mühendisliği *Electronics Engineering*
Dr. Öğr. Üyesi Özge ERSU ÇAKIR (Editör Yrd.)	İnşaat Mühendisliği *Civil Engineering*
Dr. Öğr. Üyesi Engin NACAROĞLU (Editör Yrd.)	İnşaat Mühendisliği *Civil Engineering*
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TÜMBEK (Editör Yrd)	Elektronik Mühendisliği *Electronics Engineering*
Doç. Dr. Deniz AKIN ŞAHBAZ	Kimya Mühendisliği *Chemical Engineering*
Dr. Öğr. Gör. Fatma Figen ALTINOĞLU	Jeofizik Mühendisliği *Geophysical Engineering*
Hüseyin Enes ALTINOK (Teknik Editör Yrd.)	Kimya Mühendisliği *Chemical Engineering*
Prof. Dr. Seher ARSLAN	Gıda Mühendisliği *Food Engineering*
Dr. Zeynep ÖZSÜT BOĞAR	Endüstri Mühendisliği *Industrial Engineerin*
Sinem CEYLAN KONAK (Yayın Koordinatörü)	Elektronik Mühendisliği *Electronics Engineering*
Prof. Dr. Engin ÇETİN	Elektrik Mühendisliği *Electrical Engineering*
Dr. Öğr. Üyesi Akif DEMİRÇALI	Elektrik Mühendisliği *Electrical Engineering*
Doç. Dr. Gürhan GÜNDÜZ	Bilgisayar Mühendisliği *Computer Engineering*
Doç. Dr. Levent GÜREL	Çevre Mühendisliği *Environmental Engineering*
Dr. Gökhan İMANÇLI	İnşaat Mühendisliği *Civil Engineering*
Doç. Dr. Muhammet KAMAL	İnşaat Mühendisliği *Civil Engineering*
Prof. Dr. Abdullah Cem KOÇ	İnşaat Mühendisliği *Civil Engineering*
Prof. Dr. Demet Banu KORALAY	Jeoloji Mühendisliği *Geological Engineering*
Dr. Öğr. Üyesi Pelin KOYUNCUOĞLU	Çevre Mühendisliği *Environmental Engineering*
Dr. Okan MİNNETOĞLU	Makine Mühendisliği *Mechanical Engineering*
Doç. Dr. Özkan ÖZBEK	Makine Mühendisliği *Mechanical Engineering*
Dr. Öğr. Üyesi Murat ÖZENÇ	Makine Mühendisliği *Mechanical Engineering*
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÖZEK	Elektronik Mühendisliği *Electronics Engineering*
Dr. Öğr. Üyesi Ayşe ÖZKAL	Tekstil Mühendisliği *Textile Engineering*
Elif ÖZKUL (Sekreterya)	Kimya Mühendisliği *Chemical Engineering*
Zübeyr ŞEKERCİOĞLU (Sekreterya)	Makine Mühendisliği *Mechanical Engineering*
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Alp ŞENOCAK	Endüstri Mühendisliği *Industrial Engineering*
Burcu TOKBAY ERKEK (Sekreterya)	Endüstri Mühendisliği *Industrial Engineering*
Dr. Mustafa TOSUN	Bilgisayar Mühendisliği *Computer Engineering*
Dr. Öğr. Üyesi Alper UĞUR	Bilgisayar Mühendisliği *Computer Engineering*
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ÜNAL	Elektronik Mühendisliği *Electronics Engineering*
Cansu VAR (Sekreterya)	Tekstil Mühendisliği *Textile Engineering*
Dr. Dolunay ZENGİN TOPÇUOĞLU	İnşaat Mühendisliği *Civil Engineering*

Dizgi/*Composition*
Adnan ATLAY
Öğr. Gör. Dr. Yasin ÇİNÇİN

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ
Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

CİLT/VOL. 31 SAYI/NO. 7 2025 ISSN 2147-5881

Yazışma Adresi
Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Yayın Koordinatörlüğü
20160 Denizli/TÜRKİYE

Correspondence Address
Pamukkale UniversityFaculty of EngineeringJournal of Engineering SciencesPublishing Coordinatorship
20160 Denizli/TÜRKİYE

E-posta/*E-mail*:pajes@pau.edu.tr
İnternet sayfası/*Web page*:http://pajes.pau.edu.tr/

Pamukkale ÜniversitesiMühendislik Bilimleri Dergisi hakemli bir dergidir.
Pamukkale UniversityJournal of Engineering Sciencesis a peer-reviewed journal.

ÖZETLENME/DİZİNLENME *(ABSTRACTING/INDEXING)*

ERİŞİLEBİLİRLİK *(ACCESSIBILITY)*

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ
Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

CİLT/VOL. 31 SAYI/NO. 7 2025 ISSN 2147-5881

İÇİNDEKİLER/*CONTENTS*

Makine Mühendisliği/*Mechanical Engineering*

The effect of forming process on the corrosion characteristics of DX51D galvanized steel sheets
Şekillendirme işleminin DX51D galvanizli çelik sacın korozyon davranışına etkisi
Alaaddin Toktaş, Mustafa Dülger, Gülcan Toktaş 1117

The role of welding parameters in enhancing joint strength and durability for AISI 1040 and 316 steels
AISI 1040 ve 316 çeliklerinde birleşim dayanımı ve dayanıklılığın artırılmasında kaynak parametrelerinin rolü
Yalçın Yaşar, İbrahim Aslan, Halil Burak Kaybal, Harun Yaka 1125

Gündüz nişangâhı oküler gövdesinin ağırlığını azaltmak için tasarımının değiştirilmesi ve AlSi10Mg alaşımı ile eklemeli imalatı
Changing the design of the day sight ocular body to reduce its weight and additive manufacturing with AlSi10Mg alloy
Cem Ertek, Ramazan Evrensel 1132

Investigation of microstructures, mechanical properties, wear behavior and machinability of EN-GJS-500-7 (GGG50) grade ductile cast irons having modified chemical composition
Geliştirilmiş kimyasal bileşime sahip EN-GJS-500-7 (GGG50) kalite küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapısının, mekanik özelliklerinin aşınma davranışının ve işlenebilirliğinin incelenmesi
Mehmet Yıldırım, Hüseyin Gümüş, Mehmet Emin Özcan 1143

Optimization of the design parameters of pressurized compound cylinders for equivalent stress and total cost
Basınçlı bileşik silindirlerde tasarim parametrelerinin eşdeğer gerilme ve toplam maliyet açisindan optimizasyonu
Mevlüt Aydın, Abdullah Çakan, Mevlüt Türköz 1150

Investigating the mechanical behavior of the human lumbar spine model by using finite element method
İnsan lomber omurgasının mekanik davranışının sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi
Berna Seval Doğan, Mustafa Özkaya 1164

Endüstri Mühendisliği/*Industrial Engineering*

A novel solution approach for optimization of swarm UAV formation control problem under uncertain and dynamic constraints: Crazyfly 2.0 application
Belirsiz ve dinamik kısıtlar altında sürü İHA formasyon kontrol probleminin optimizasyonu için yeni bir çözüm yaklaşımı: Crazyfly 2.0 uygulaması
Ukbe Üsame Uçar, Burak Tanyeri 1170

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ
Pamukkale University Journal of Engineering Sciences
CİLT/VOL. 31 SAYI/NO. 7 2025 ISSN 2147-5881

Stratejik yönetim temelli sürdürülebilir kalite güvencesi modeli: gelişmekte olan bir devlet üniversitesinde uygulamalar
Establishing a sustainable quality assurance model through strategic management: a case study in a developing state university
Mustafa Egemen Taner, Samet Sadırlı 1192

Çift üstel düzeltme, ARIMA ve yapay sinir ağları ile kısa mesaj miktarının tahmini
Forecasting the short message quantity with double exponential smoothing, ARIMA and artificial neural networks
Mehtap Parlak, Gonca Yıldırım 1211

Elektrik-Elektronik Mühendisliği/*Electrical and Electronics Engineering*

Tek anahtarlı kısmi rezonanslı inverterde güvenli çalışma bölgesi
Safe operating area in single switch quasi resonant inverter
Metin Öztürk 1225

Desing of class AB EDDCC+ with the feature of electronic tunability
Elektronik ayarlanabilir AB sınıfı EDDCC+ tasarımı
Tayfun Unuk, Tolga Yucehan 1235

Yavaş dalgalı mikroşerit yapılarla iki ve dört yollu Wilkinson güç bölücü tasarımı
Two-and four-way Wilkinson power divider design with slow-wave microstrip structures
Mehmet Çakır, Ceyhun Karpuz 1239

Afyonkarahisar rüzgâr enerji potansiyelinin TR33 kalkınma bölgesi illeriyle karşılaştırmalı analizi ve örnek bir fizibilite
Comparative analysis of Afyonkarahisar wind energy potential with TR33 development region provinces and a sample feasibility
Fatih Serttaş 1245

A stable and fast PSO algorithm guided by SPSA for vector quantization-based image compression
Vector nicemleme tabanlı görüntü sıkıştırma için EPSY ile yönlendirilen kararlı ve hızlı bir PSO algoritması
İlker Kılıç, Haldun Sarnel 1255

Renewable energy production in Artvin Çoruh University ANG Botanical Garden: Potential, application and challenges
Artvin Çoruh Üniversitesi ANG Botanik Bahçesi'nde yenilenebilir enerji üretimi: Potansiyel, uygulama ve zorluklar
Adalet Keskin, Elanur Adar Yazar, Kadir Doğanşahin 1268

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ
Pamukkale University Journal of Engineering Sciences
CİLT/VOL. 31 SAYI/NO. 7 2025 ISSN 2147-5881

Bilgisayar Mühendisliği/*Computer Engineering*

Amazon veri setinde tüketici duygularını değerlendirmek için derin öğrenme yaklaşımı
A deep learning approach for assessing consumer sentiment in amazon dataset
Nazeeha Sayghn Khalid Khalid, Serkan Savaş 1277

Localization evaluation of CAM based explainability techniques for plant disease detection
Bitki hastalığı tespiti için CAM tabanlı açıklanabilirlik yöntemlerinin yerelleştirme değerlendirmesi
Duygu Sinanç Terzi 1287

FPGA prototipleme: RISC-V tabanlı SoC için çip üstü hata ayıklama modülü ve Raspberry Pi ile OpenOCD JTAG üzerinden test süreçleri
FPGA prototyping: On-chip debug module for RISC-V based SoC and testing processes using Raspberry Pi with OpenOCD over JTAG
Sezen Bal, Hayriye Korkmaz, Doğukan Biçer, Celal Alperen Bayar, Eren Kale, Eray Kayailli, Armağan Bi 1299

Çevre Mühendisliği/*Environmental Engineering*

Polybrominated diphenyl ethers in surface water sources and sediments of the Konya Closed Basin and environmental risk assessment
Konya Kapalı Havzası yüzeysel su kaynakları su ve sedimentlerinde polibromlu difenil eterler ve çevresel risk değerlendirmesi
Arzu Ulvi, Senar Aydin, Mehmet Emin Aydin 1307

Reduction of nitrate by biogenic sulfide in denitrifying membrane-sulfidogenic up flow column reactor system
Yeraltı sularından nitrat ve sülfatın denitrifikasyon membran-sülfidojenik yukarı akışlı kolon sıralı reaktör sisteminde giderimi
Amine Yücel, Tülay Yılmaz, Deniz Uçar 1321

Tekstil Mühendisliği/*Textile Engineering*

Elektro üretim tekniği kullanılarak postbiyotik içeren nanoliflerin üretimi
Production of nanofibers containing postbiotics using electrospinning method
Aleyna Sure Öztürk, Ahmet Koluman 1327

Kimya Mühendisliği/*Chemical Engineering*

Upgraded bio-oil production with catalytic co-pyrolysis of spruce sawdust
Ladin talaşının katalitik kopiroliziyle geliştirilmiş biyo-yağ üretimi
Ahmet Rasim Girişen, Hakan Ozcan 1335

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ
Pamukkale University Journal of Engineering Sciences
CİLT/VOL. 31 SAYI/NO. 7 2025 ISSN 2147-5881

Synthesis, characterization, and photocatalytic performance evaluation of manganese tungstate for methyl red dye degradation
Mangan tungstatın sentezi, karakterizasyonu ve metil kırmızı boya giderimi için fotokatalitik performans değerlendirmesi
Mehmet Kayhan, Emine Kayhan 1344

Impact of titanate coated magnetite nanoparticles on the properties of rigid polyurethane foams
Titanat kaplı manyetit nanopartiküllerin sert poliüretan köpüklerin özellikleri üzerindeki etkisi
Buse Fem Yılmaz, Meral Akkoyun Kurtlu, Sibel Tuna 1350

Gıda Mühendisliği/*Food Engineering*

Zerde (yellow rice pudding) prepared using different spices: Biological activity, physical properties, textural properties and aroma profile
Farklı baharatlar kullanılarak hazırlanan zerde (sarı renkli pirinçli puding): Biyolojik aktivite, fiziksel özellikler, tekstürel özellikler ve aroma profili
Nebahat Kıratlı, Seher Arslan 1357

Formulation and development of a high-fiber snack bar with baobab and lupin flour
Baobab ve acı bakla unu ile yüksek lifli bir atıştırmalık barın formülasyonu ve geliştirilmesi
Ceren Oğuz, Filiz Hazal, Hatice Neval Özbek, Banu Koç, Fahrettin Göğüş 1366

Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 31(7), 1117-1124, 2025

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

The effect of forming process on the corrosion characteristics of DX51D galvanized steel sheets

Şekillendirme işleminin DX51D galvanizli çelik sacın korozyon davranışına etkisi

Alaaddin Toktaş[1*], *Mustafa Dülger*[2], *Gülcan Toktaş*[1]

[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Balıkesir University, Balıkesir, Türkiye.
atoktas@balikesir.edu.tr, gzeytin@balikesir.edu.tr

[2]Anka Poultry Equipment Systems, Balıkesir, Türkiye.
mustafa.dulger99@gmail.com

Received/Geliş Tarihi: 13.08.2024 Revision/Düzeltme Tarihi: 15.02.2025 doi: 10.5505/pajes.2025.63838
Accepted/Kabul Tarihi: 20.03.2025 Research Article/Araştırma Makalesi

Abstract

This study examines the effect of forming (bending and folding) procedures on the corrosion behavior of galvanized sheet steel in poultry manure. It also aims to compare the corrosion behavior in poultry manure with salty and atmospheric environments. To achieve this objective, samples were prepared by laser cutting DX51D galvanized sheets. These samples were then subjected to various bending processes, including V, L, U, and Z-bendings, as well as multiple bending, folding, and folding+bending techniques. The samples underwent salt spray testing to determine the percentages of white and red rust on their surfaces. The samples, including laser cut, V-bendings, multiple bending, and folding, were exposed to the atmosphere and poultry manure settings for 28 days. The corrosion rates in these environments were calculated by measuring the mass losses every seven days. In the salt spray test, 60° bent samples exhibited the most corrosion resistance compared to the other forms, showing minimum percentages of white (56%) and red (4%) rust. The frame-cut sample showed a maximum corrosion rate of 0.00152 mm/year in the atmosphere. Bending and folding processes had no detrimental effect on the galvanized coating, such as peeling or flaking the coating. However, corrosion affected the bent and folded regions negatively by decreasing the coating thickness.

Keywords: Galvanized steel, Bending, Salt spray test, Corrosion rate.

Öz

Bu çalışma şekillendirmenin (eğme ve katlamanın) galvanizli çelik sacın tavuk gübresindeki korozyon davranışını incelemektedir. Aynı zamanda çalışma, tavuk gübresindeki korozyon davranışını tuz sisi ve atmosfer ortamları ile karşılaştırmayı hedeflemektedir. Bunun için DX51D galvanizli çelik lazer yöntemiyle kesilerek numuneler elde edilmiştir. Daha sonra bu numunelere değişik formlarda eğme işlemleri uygulanmıştır. Bunlar V, L, U, ve Z-eğme ile çoklu eğme, katlama ve katlama artı eğme işlemleridir. Numuneler tuz sisi deneyine tabi tutularak yüzeylerinde oluşan beyaz ve kırmızı pas oranları belirlenmiştir. Lazer kesim, V-eğme, çoklu eğme ve katlama ile şekillendirilen numuneler atmosfer ve tavuk gübresi ortamlarında 28 gün bekletilmişlerdir. Bu ortamlardaki korozyon hızları numunelerin her yedi günde ortamdan alınarak kütle kaybı ölçümlerinden hesaplanmıştır. Tuz sisi deneyinde 60° eğme ile şekillendirilen numuneler %58 beyaz pas ve %4 kırmızı pas oranları ile diğer şekillendirmelere göre en yüksek korozyon direnci göstermişlerdir. Atmosfer ortamında çerçeve kesim numuneleri 0.00152 mm/yıl değeri ile en yüksek korozyon hızı göstermişlerdir. Eğme ve katlama işlemlerinin galvaniz kaplamaya, kaplamanın soyulması veya pul pul dökülmesi gibi zararlı bir etkisi olmamıştır. Ancak korozyon kaplama kalınlığını azaltarak eğilen ve katlanan bölgeleri olumsuz yönde etkilemiştir.

Anahtar kelimeler: Galvanizli çelik, Eğme, Tuz sisi testi, Korozyon hızı.

1 Introduction

Galvanizing is a very efficient method for safeguarding Fe-based alloys from corrosion. It provides long-lasting durability, economic advantages, and dependable application performance. Zinc coatings by galvanizing are protected against corrosion in three different ways: the environmental barrier effect of the zinc layer, the secondary barrier effects of zinc corrosive products that occur over time, and the cathodic protection of the steel by sacrificing itself when there is an inconsistency in the coating [1],[2]. Galvanizing offers extensive protection, encompassing corners, edges, and recessed places that may be difficult by alternative coatings. The galvanizing process forms a strong metallurgical link between zinc and steel, guarantees exceptional adhesion, and prevents peeling or flaking [3]. Galvanizing is a versatile process that may be used on a diverse array of steel goods and structures, making it well-suited for several industries such as building, automotive, farming, petrochemical, electrical, and marine industry [4].

The zinc coating obtained by the hot dip galvanization process consists of a series of Fe-Zn intermetallic phases of different thicknesses and properties, increasingly enriched in Fe from the coating surface to the substrate material. The zinc coating consists of the intermetallic Fe-Zn compounds called eta (η-%0.03 Fe) and zeta (ξ-%6-7 Fe), delta (δ-%8-13 Fe), and gamma (Γ-%18-31 Fe) phases, with increased Zn content towards the outer surface. Fe-Zn alloy layers are less tough and fragile and have limited mechanical shaping abilities. The pure zinc layer is softer and more resistant to this type of mechanical stress [2].

Galvanized steels typically require shaping into different forms using various processes such as bending, drawing,

*Corresponding author/Yazışılan Yazar

stamping, and roll forming. The galvanized steel can be formed because the zinc is soft and ductile. For instance, compressive stress may easily occur by press forming without peeling off in galvanized steel sheets [5]. But still, forming techniques should be applied with great attention to prevent any cracking or flaking of the coating. When forming, it is important to consider the thickness of the coating and its brittleness. Increased coating thickness can make the surface more susceptible to breaking, especially at low temperatures, where the zinc coating may become brittle. Certain precautions, such as lubricating the forming tool, using appropriate tools and zinc coating, and processing at a reasonable temperature, are essential to ensure non-damaged formed coatings. If the galvanized surface has sustained damage despite using these safeguards, it is possible to repair it. If the extent of the damage is significant, the affected portion can undergo a process of re-galvanization. For tiny damages, it is possible to apply thermal spraying, paint with zinc-rich paints, and solder with a zinc-alloy stick [6].

Several types of corrosion on the formed galvanized steels can occur over time according to the service environment, such as white rust, red rust, and pitting corrosion. Damages during forming, coating thickness (beneficial in corrosion resistance but detrimental in forming due to brittleness), moisture, and external mechanical damages, such as scratches, abrasions, and cuts, are primary factors affecting the corrosion behavior of formed galvanized steels. Forming type and deformation modes can also affect the corrosion behavior of galvanized surfaces. Vagge et al. reported that the biaxial deformation mode caused low resistance to corrosion in the hot-dip galvanized steel sheets [5]. Ploypech et al. studied crack formation and propagation in galvanized steel under loads at four-point bending conditions [7]. They found that longitudinal cracks formed in the δ layer due to thermal stresses resulting from cooling, and the cracks spread outwards with increasing bending forces. In the other study, the fracture toughness of the galvanized low and medium-carbon steels was investigated using three-point bending [8]. The authors concluded that the low carbon (0.08%) steel showed higher resistance to fracture compared to the medium carbon (0.24%) steel after galvanization. Camurri et al. examined the effect of static (three-point bend) and dynamic (fatigue bending) stresses on hot dip galvanized SAE 1020 steel [9]. They concluded that the zinc bath composition should be adjusted to minimize the thinner brittle layers to achieve good fatigue resistance. They succeeded in this with the Zn-Fe-Ti-0.012%Al and Zn-Fe-Ti-0.01%Al-0.037%Ni bath compositions. Forming methods have primarily been utilized on standard test samples under controlled laboratory circumstances, as evidenced by the previously mentioned research and numerous more. Nevertheless, many laboratory conditions cannot replicate the same situations seen in the real world.

This study is organized to investigate the effect of forming methods that have equivalents in the poultry industry on galvanized steel in terms of corrosion. In this industry, many chemicals, such as nitrates, sulfates, chlorides, hydrogen sulfide, and ammonia, induce corrosion [10]. Oyewole et al. searched the surface degradation of galvanized steel used in farm structures in poultry dung, pig dung, and urea solutions using an inhibitor, rice straw extract [10]. The phytochemical analysis verified the good inhibition effect of rice husk. They achieved the highest inhibition efficiency of 88.59% by the passive film formation, which was attributed to the adsorption via rice straw extract.

This study aims to investigate the effect of actual forming processes (V, L, U, Z-bendings, multiple bending, and folding) on the corrosion behavior of galvanized steel sheets (DX51D) commonly used in chicken farms. The corrosion behavior of the formed galvanized sheets in the poultry manure has been compared with the corrosion behaviors in salt spray and atmospheric conditions.

2 Materials and method

The chemical composition of a 1 mm thickness galvanized DX51D sheet steel supplied from Gökmetal A.Ş is given in Table 1.

Table 1. Chemical composition of DX51D steel (wt.%).

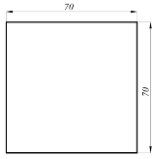
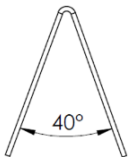
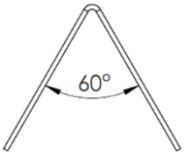
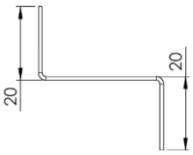
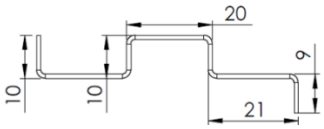
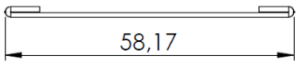
C:	0.0451	Cr:	0.0284
Si:	0.0226	Al:	0.0466
Mn:	0.1720	Cu:	0.0290
P:	0.0180	Zn:	0.0022
S:	0.0069	Fe:	balance

The galvanized coating thickness was determined by Fisherscope X-Ray XDL and XDLM X-ray fluorescence spectrometer following ISO 3497 standard. Three measurements were done and averaged as 6.64 µm for coating thickness. A Hitachi M-1000 scanning electron microscope (SEM) was used to view the galvanized coating thickness.

Galvanized sheet steels were cut with a Mekotek FLO-1530 model fiber laser machine in dimensions of 70x70 mm^2. The cutting speed was set to 6 m/min, and the distance between the cutting tip and the sheet was 1 mm. Following the cutting procedure, the samples were shaped using the forming techniques, which involved V, L, U, and Z bendings, multiple bending, folding, and folding+bending processes. The Durmazlar brand press brake machine was utilized for the shaping procedure. The blade used is EURAM-1012/A35/1 type. The CKB brand D2088/88/V6/H80 model lower mold was used for L-bending. The bending load for L bending is 800 kg. CKB brand D2030/30/V8/H80 model was used as the lower mold in 40° and 60° V bendings. In folding+bending, the D3001/35/6/H90 model of the CKB brand was used as the lower mold. Sample codes are given in Table 2 with their shaping methods. After the bending and folding processes, no cracks, peeling, flaking, or any failure on the galvanized surfaces of samples were observed by the visual inspection.

Salt spray tests were carried out at Uzman Katoferez (Bursa). The salt spray test was performed under the BS EN ISO 9227:2006 requirements. Sodium chloride is dissolved in deionized water with a conductivity of 0.2 µS/cm at 25 °C to a concentration of 50 g/l for obtaining a 5% salt solution according to the standard. The specific weight of the solution at 25 °C is 1.032 gr/cm^3. The salt test cabin's pH is set to 6.9. The pH was adjusted by adding sodium hydroxide into the salt solution. The temperature in the cabin was fixed at 35 °C ±3 °C utilizing heaters. Salt mist spraying was carried out in the range of 1.5±0.188 bar. The devices used for placing samples in the cabin have phosphorized surfaces and are subsequently painted and baked with electrostatic powder paint. No corrosion occurred in these devices in the test cabin. The samples had been kept in the salt spray testing cabin for 72 hours. Then, the samples were digitally photographed.

Table 2. Sample codes and shaping methods.

Codes	Process	View
FC	Frame Cutting (70 mm ×70 mm)	
40VB	40° V Bending	
60VB	60° V Bending	
LB	L Bending	
UB	U Bending	
ZB	Z Bending	
MB	Multiple Bending	
F	Folding	
FB	Folding+Bending	

The red and white rust percentages on the samples were determined via the template method. In this method, a square of size 70 x 70 mm² is drawn on an acetate paper. Twenty-five equal squares are drawn inside the drawn square. Each small square corresponds to 4%. The template is placed on the samples, and the red and white rust falling inside the squares is evaluated in terms of % rust. Since the formation of red rust will occur after the formation of white rust, the occurrence of red and white rust in the same frame is counted as two ratios. Under these conditions, the red rust rate in galvanized parts cannot be higher than the white rust.

After salt spray tests, red and white rust formations were scraped from the surfaces and placed in separate closed containers. These samples were analyzed with the ICP-OES device, and the Fe and Zn ratios in the rust content were analyzed. The given samples were dissolved in acid cocktails (HNO_3, HCl, HF, $HClO_4$), the solutions were placed in pressurized containers, and the content was determined by stimulating them with Ar gas. This test was carried out according to standard SM 3120 B. Furthermore, white and red rusted sites were investigated with a Fisherscope X-ray device for coating thickness and elemental analysis.

Some forms of the galvanized sheets were tested in the atmospheric and poultry manure environments between 25.04.2024 and 23.05.2024 dates. The samples were placed on a 10 cm × 10 cm grooved wooden wedge for the atmospheric corrosion tests. Atmospheric conditions include rain, dew, sun, temperature difference, humidity, and wind. The samples were left in an open area with constant sunlight and nightfall during the day.

Products used in the poultry industry are produced from galvanized sheets. Sheets are exposed to various compounds in poultry manure. Therefore, the samples were buried in the poultry manure, using a container of 26.5cm×17cm×3.5cm in dimension. Constituents of poultry manure are given in Table 3.

Table 3. Constituents and pH of a poultry manure [12].

pH:	6.95	NO_3-N:	%0.02
N:	%0.96	Ca:	%1.34
OC:	%4.67	K:	%0.13
P:	%0.27	Na:	%0.026
NH_4-H:	%0.42	Cu:	6.89 ppm

The samples, held in the atmosphere and poultry manure, were taken from the corrosive environments every seven days, and their surfaces were gently cleaned and dried. After that, weight measurements were made with a Denver Instrument SI-234 Summit analytical balance with 0.1 mg sensitivity. Using the weight losses, corrosion rates were determined by Equation 1, where W is mass loss (mg), D is density (g/cm³), A is area (cm²), and T is duration (h) [11].

$$R_{corr.} = \frac{87.6 \times W}{D \times A \times T} \quad (1)$$

3 Results and discussion

The cross-sectional view of the galvanized coating obtained by SEM is given in Figure 1. The zinc coating is measured at 6 µm in this figure, corresponding well with the X-ray measurement (6.64 µm).

Figure 2 illustrates the identification of white and red rust rates by the template method for the frame-cut (FC) sample with no forming process tested in the salt spray. Due to the flexibility of acetate paper, this measurement technique was easily applied to all formed samples, even those with complex forms.

The percentages of white and red rusts of all salt spray tested samples are given in Figure 3. White rust is a prevalent type of corrosion that initially occurs on galvanized steel when it encounters moisture and oxygen. Corrosion frequently occurs during the initial phases of exposure to a corrosive atmosphere, such as in a salt spray test.

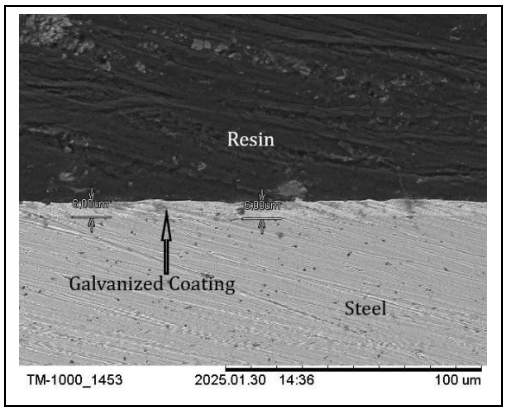


Figure 1. The cross-section of the galvanized coating.

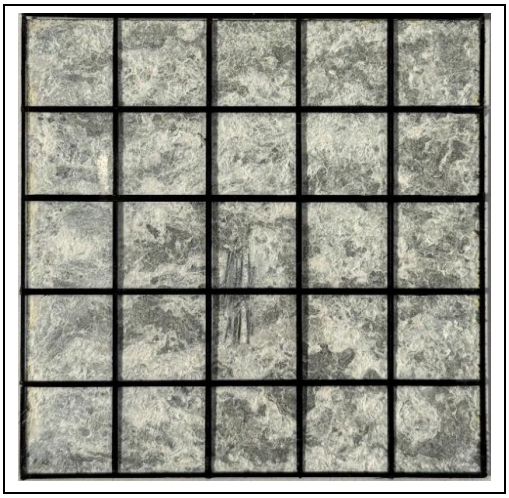


Figure 2. White and red rust rate identification for the FC sample via the template method.

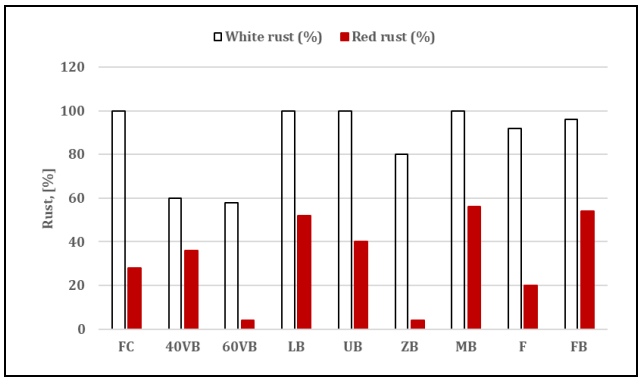
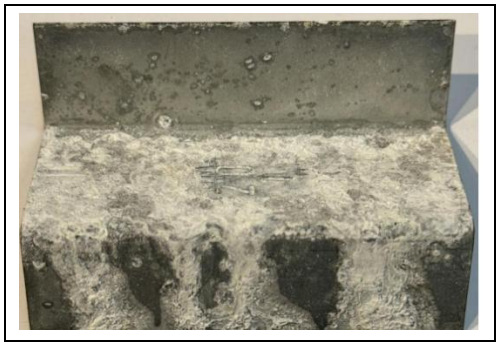


Figure 3. White and red rust percentages after salt spray tests.

The white, chalky deposit is visible on the surface of the galvanized coating. Although white rust may impact the visual aspect of galvanized steel, it often does not substantially diminish the zinc coating's protective qualities. Red rust forms as the steel beneath the coating erodes by depletion of the zinc coating. This suggests the zinc coating has been compromised or fully corroded in specific regions [13]. The reddish-brown rust observed is characteristic of iron oxide, indicating the oxidation of the steel substrate. Red rust occurs when the integrity of the zinc coating is damaged, enabling moisture and oxygen to penetrate the steel and start the corrosion process. Red rust is a more severe issue than white rust since it signifies the failure of the protective zinc coating in those specific regions. This results in the corrosion of the steel, which may threaten the structural stability and durability of the material [14].

After the inspection of the rust analysis by the ICP-OES device, it was found that the white rust had 70.5% Zn, while the red rust contained 34.8% Fe. The amount of Fe in the gamma (Γ), the coating's bottom and adjacent phase layer to the steel, is reported to be between 18% and 31% in the literature [2]. This result confirms that the galvanized coating disappeared before the red rust formed and rust reached the steel base, showing a problematic situation in terms of corrosion of sheet steel.

The white rust percentages are higher for all samples, as expected. The minimum red rust percentage is obtained in 60° V (60VB) and Z-bent (ZB) samples as 4% Figure 4(a). The highest red rust percentage is in the multiple-bent (MB) sample at 56% Figure 4(b). The 60VB sample showed minimum percentages of both white and red rust. The red rust percentages of the three samples (L-bent, multiple-bent, and folded+bent) are higher than 50%. Generally, the white rust is recognized in all shaped samples by the duration of 72 h in the salty environment. This result is consistent with literature. Haiducu et al. observed white rust formation on steel galvanized at various batch temperatures and durations within 48 h of exposure in salt spray testing [15].



(a)



(b)

Figure 4. After the salt spray test. (a): ZB sample with minimum red rust. (b): MB sample with maximum red rust.

The X-ray of the MB sample, showing the highest red rust after the salt spray test, is given in Figure 5, depicting the elemental analysis of the white and red rust in this sample. By examining the white rust, the galvanized coating thickness is averaged by three measurements as 4.20 μm, an acceptable coating thickness for corrosion resistance (Figure 5(a)). On the other

hand, the zinc coating thickness in the red rust region was 1.4 µm by averaging five measurements (Figure 5(b)). There were coating thickness values below 1 µm, indicating destroyed coating and vulnerable to corrosion. This result is confirmed by the Zn amounts, where red rust has rather less Zn than white rust. Inversely, the Fe amount is higher in red rust, meaning that the zinc coating disappeared and the red rust containing iron oxides formed. The chromium (Cr) element was also identified in the galvanized coatings. According to the literature, the Cr element comes from the passivation treatment, applied after galvanizing to form a dense protective film for extending the service life of the galvanized coating [16]. The film produced by the passivation prevents the formation of white rust or delays the onset of white rust, maintaining the appearance of the coating.

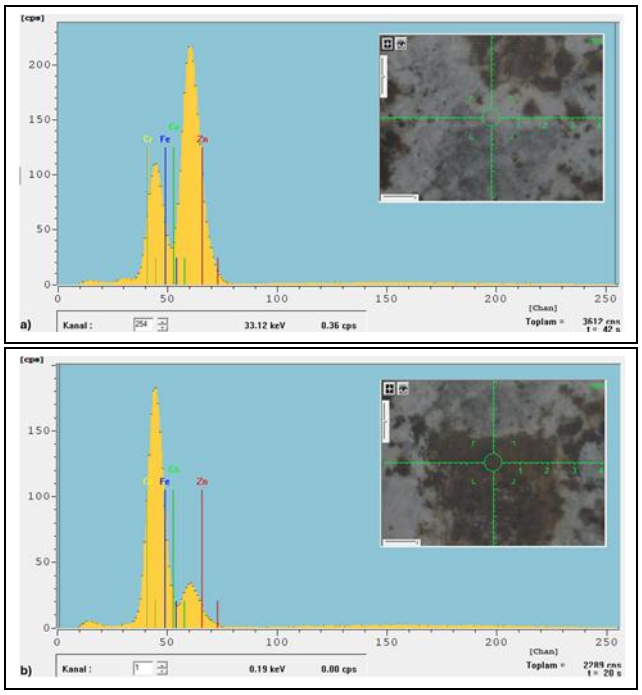


Figure 5. X-ray analysis of (a): White rust, and (b): Red rust in salt spray tested MB sample.

Figure 6 illustrates the corrosion rates of some samples (FC, 40VB, 60VB, MB, and F) over 28 days in the atmosphere, measuring mass losses at the end of every 7 days. After the seventh day, while the F sample showed a maximum corrosion rate of 0.00204 mm/year, the 40VB one had a minimum value of 0.00086 mm/year. The F sample's corrosion rates decreased gradually towards day 28. Inversely, the 40VB sample's corrosion rate increased with duration. After the end of the 28th day, the F sample's corrosion rate was lower than that of 40VB. These two samples showed nearly the same corrosion rates at the end of the 14th day.

The corrosion rates of the 60VB sample on the 7th and 28th days are close to each other. This sample showed a relatively stable corrosion rate throughout the period, with a slight peak around the 21st day. When the corrosion rates of a material are stable, it means that the material has established a consistent state in its association with the corrosive environment. Based on the findings of the present study, it can be inferred that the 60VB sample is more trustworthy for extended periods of use in atmospheric situations.

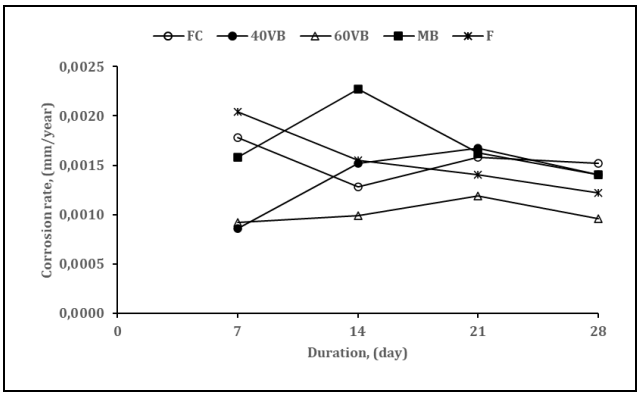


Figure 6. Corrosion rates of some samples in the atmosphere.

In the FC sample, the second highest corrosion rate is inferred on the 7th day, showing a decrease in the next seven days, then increasing for the remaining duration. At the end of the 28th day, the frame cut sample had the highest corrosion rate of 0.00152 mm/year.

The MB sample's corrosion rate showed a maximum peak value of 0.00227 mm/year on the 14th day, then decreased relatively rapidly at the end of the next seven days (the 21st day), continuing to decline but more slightly. After 28 days, its corrosion rate is below the frame-cut sample's.

The corrosion rates of the samples held in the atmosphere are given in Figure 7 for the poultry manure environment. In this environment, after the 7 days of corrosion, while the frame-cut sample showed a maximum corrosion rate of 0.04810 mm/year, the 60VB sample had a minimum value of 0.02208 mm/year, below nearly half of the FC sample value.

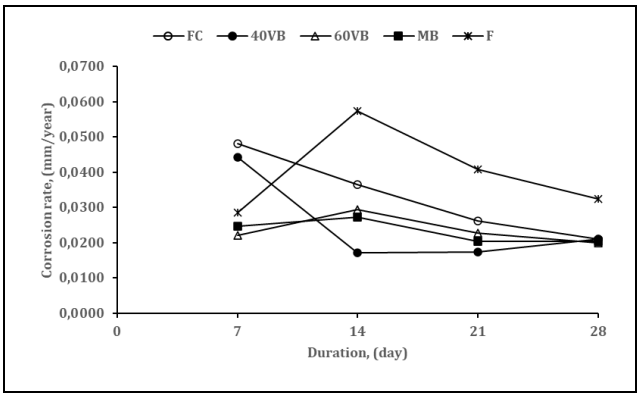


Figure 7. Corrosion rates of some formed samples in a poultry manure environment.

The corrosion rates of the 60VB and MB samples show relatively stable behavior, suggesting better corrosion resistance in poultry manure after 28 days. The FC and 40VB samples' corrosion rates are decreased gradually with the duration time. The folded (F) sample has a peak value of corrosion rate (0.05730 mm/year) on the 14th day, then decreases after that. Despite this decrease, the highest corrosion rate is determined for the F sample as 0.03234 mm/year at the end of 28 days. All samples, except for the F, showed nearly similar corrosion rates after 28 days in the poultry manure environment. The decrease in corrosion rates over time is in line with the development of protective layers and the stabilization of corrosion rates. Decreases in corrosion rates with elapsed time were explained by Hernandez-Alvarado et al. with the formation and growth of

an adherent, white corrosion layer composed of zinc hydroxychloride and zinc hydroxide [17].

All obtained corrosion rates, even those measured in the poultry manure environment, are acceptable. According to the literature, corrosion rates between 25-100 µm/year are considered excellent per widely used classifications [17].

Comparing the corrosion rates of the same formed samples in two environments (atmosphere and poultry manure), the 60VB sample showed the most stable behavior by showing little corrosion rate differences between the 7th and 28th days. In addition, the corrosion rates of all samples are very high in poultry manure. The corrosion rates for FC, 40VB, 60VB, MB, and F samples are, respectively, 14, 15, 21, 17, and 23 times higher in poultry manure after 28 days of corrosion. This result suggests that poultry manure is a more corrosive medium than the atmosphere due to many chemicals (Table 2). When used in natural atmospheric conditions, galvanized sheets have a thin passive zinc carbonate layer that begins to form immediately after production and continues to slow down. This layer, which is the product, partially protects the sheet from severe corrosion that may occur later, but this natural barrier is insufficient for many strong corrosive environmental conditions. The mechanism of formation of this corrosion layer is as follows [18]:

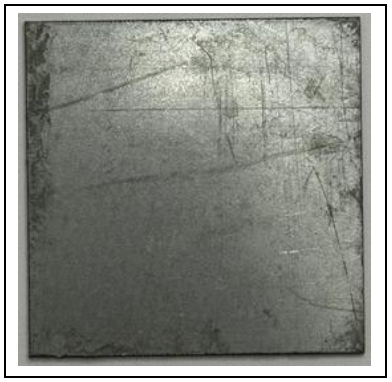
$$Zn + \frac{1}{2}O \rightarrow ZnO$$

$$ZnO + H_2O \rightarrow Zn(OH)_2$$

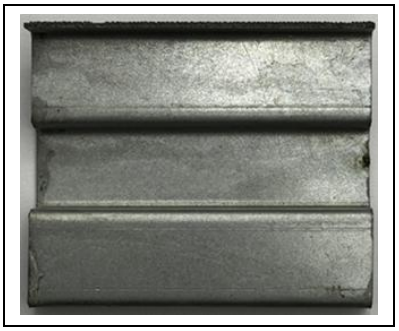
$$Zn(OH)_2 + CO_2 \rightarrow ZnCO_3 + H_2O$$

Figure 8 illustrates the corroded surfaces of FC and MB samples after 28 days of corrosion in the atmosphere and poultry manure. It is inferred from the figure that poultry manure showed a more severe corrosive effect, showing clear surface degradations on both sample surfaces Figure 8(c) and (d). In the atmospheric condition, Figure 8(a) and (b), in parallel with the low corrosion rates, generally smooth and unaffected surfaces are seen, showing the protective layer effect of the zinc coating. Few local degradations can be seen, especially near the cut edges, showing that laser cutting has a detrimental effect on corrosion resistance. This result can be attributed to the generated high temperatures, above the melting point of zinc, and burning galvanized coating in and near the cut sections by laser cutting. Therefore, the galvanized layer's protective effect may have been compromised in these specific places, leading to its accelerated deterioration due to increased reactivity with the corrosive environment. No visible reddish-brown rust formation is recognized in the FC, MB, and other sample surfaces (40VB, 60VB, and F) in the poultry manure after 28 days. However, the coating thicknesses were measured below 1 µm, as 0.634 µm and 0.427 µm, respectively, too low for corrosion resistance at dark-colored corroded surfaces of MB and F samples. This suggests that the red rust formation may begin, even if not visible to the naked eye, due to the low coating thickness in these places.

During the galvanized coating in the atmosphere, a film of zinc compounds, highly insoluble in water, such as ZnO and $ZnCO_3$, occurs. This film protects the zinc coating by isolating the sensitive substrate from an aggressive environment. However, this film is affected by certain ions, such as chlorine and sulfate ions, which react with the protective film and form soluble compounds, decreasing the corrosion resistance and forming red rust on the surface [19]. The absence of aggressive ions in the atmosphere, according to salty and poultry manure environments, smooth and non-corroded surfaces are seen in atmospheric conditions by comparing Figures 4 and 8.



(a)



(b)



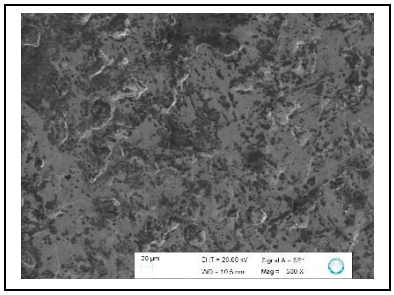
(c)



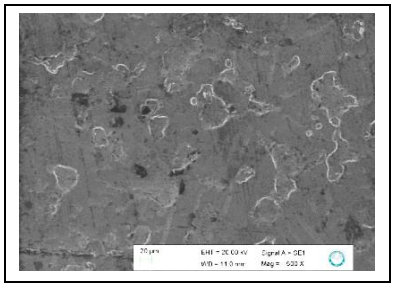
(d)

Figure 8. Corroded surfaces of (a): FC, (b): MB samples in the atmosphere, and (c): FC, (d): MB samples in poultry manure.

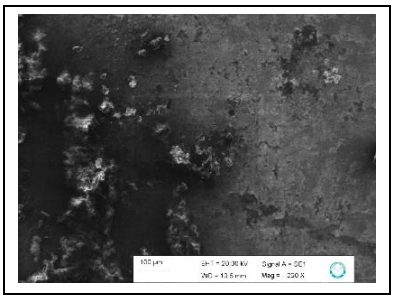
Figures 9(a) and (b) show the corroded surface morphologies in the atmosphere for the 60VB and FC samples, respectively. A relatively uniform corrosion with evidence of small pittings is seen in both figures. These pittings are more on the 60VB's surface. Figures 9(c) and (d) illustrate the corroded surfaces of the 60VB and F samples in the poultry manure. Contrary to Figures 9(a) and (b), these surfaces depict severe localized corrosion with clear irregular corrosion products. The aggressive constituents of the poultry manure, such as ammonia and organic acids, could have caused these products. The surfaces appear rougher with deeper pittings due to higher corrosion rates in the poultry manure, as verified by Figure 7.



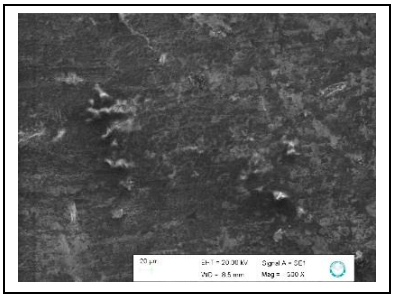
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 9. Corroded surfaces of (a): 60VB, (b): FC samples in the atmosphere, and (c): 60VB, (d): F in the poultry manure.

Evaluating salt spray, atmosphere, and poultry manure corrosive environments, 60VB samples showed the highest corrosion resistance with the minimum white and red rust percentages in salt spray tests and steady and lowest corrosion rates at 28 days of duration in the atmospheric and poultry manure environments. In the salt spray testing, the multiple-bent (MB) sample has higher white and red rust percentages. While this sample showed high corrosion rates in the atmosphere, in line with the salt spray testing result, it had low and steady corrosion rates in the poultry manure. This result shows that the corrosion environments do not show a parallel effect on the same formed galvanized sheets. This result can be attributed to the different corrosion product formations on the galvanized surface in various corrosive environments.

After the corrosion tests, the bent and folded regions of the samples were macro-investigated by a digital camera. This inspection detected no cracks, peeling, flaking, or any other failure on the formed galvanized coating. Only the corrosion phenomenon affected these formed surfaces adversely by depleting or thinning the galvanized coating. For instance, the 60VB sample had 1.97 µm and 5.11 µm coating thicknesses at the critical surface (upper of the angle) in the poultry manure and atmosphere, respectively. The coating thicknesses of the plane surfaces of this sample had relatively higher values, meaning that the critical surfaces were prone to corrosion sensitivity. This effect may be attributed to the residual tensile stresses on the outer surface that occur due to bending. Yang et al. reported that tensile stress may increase active, reactive sites, increase the zinc dissolution rate, and result in the depletion process of zinc coating [20].

4 Conclusions

The corrosion behavior of DX51D galvanized steel sheets was examined in three environments (salty, atmosphere, and poultry manure) with frame-cut and V, L, U, Z-bent, multiple bent, folded, and folded+bent samples. According to the results, the following conclusions can be drawn:

- In the salt spray test, 60° bent samples (60VB) exhibited the most corrosion resistance compared to the other forms, showing minimum percentages of both white (56%) and red (4%) rust. After the salt spray tests, white and red rusts had 70.5% Zn and 34.8% Fe atoms, respectively,
- After 28 days, while the frame-cut (FC) sample showed a maximum corrosion rate of 0.00152 mm/year in the atmosphere, the folded (F) sample exhibited the highest corrosion rate (0.03234 mm/year) in the poultry manure. The 60VB samples are the most corrosion-resistant form in the salty, atmosphere, and poultry manure,
- The poultry manure was a more corrosive medium, showing 14-23 times higher corrosion rates for the same formed samples than the atmosphere, due to having many chemicals,
- While the reddish-brown corrosion products had not been observed in the poultry manure for 28 days, the zinc coating thickness decreased below 1 µm, which is sensitive to corrosion,
- Cutting the edges by laser technique is not recommended because of burning the zinc coating at and near the cut edges due to high temperatures when cutting. These burned edges could be priority locations for the beginning corrosion,

- Forming processes (bending and folding) had no detrimental effect on the galvanized coating layer. Additionally, no peeling or flaking occurred in the critic-shaped surfaces after corrosion tests. However, coating thicknesses decreased below 1 μm on these surfaces in the poultry manure due to residual tensile stresses generated by forming processes.

5 Acknowledgement

The authors would like to thank Uzman Katoferez, Bursa and Anka Poultry Equipment, Balıkesir for their valuable helps in salt spray tests and sheet metal forming processes, respectively.

6 Authors' contribution statements

Alaaddin Toktaş, contributed to the creation of the idea, designed the experimental procedure, wrote, reviewed, and proofread the paper. Mustafa Dülger, reviewed the literature, performed the planned experiments, and collected data. Gülcan Toktaş, contributed to planning the tests, analyzing the results, writing, reviewing, and proofreading the paper.

7 Ethics committee approval and conflict of interest statement

"There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared".

"There is no conflict of interest with any person/institution in the article prepared".

8 References

[1] Ciubotariu AC, Istrate GG. "Corrosion rate of steels DX51D and S220GD in different corrosion environment". *Scientific Bulletin of Naval Academy*, 19(1), 166-172, 2016.

[2] Şirin ŞY. "The effect of hot dip galvanizing process on the fatigue properties of hot rolled and quenched-tempered AISI 4340 steel". *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 24(4), 626-634, 2018.

[3] Najafabadi EP, Heidarpour A, Raina S, Arashpour M, Zhao XL. "Effects of galvanization on the mechanical properties of high and ultra-high-strength steel tubes". *ce/papers*, 4(2-4), 1606-1611, 2021.

[4] Singh JK, Mandal S, Adnin RJ, Lee HS, Yang HM. "Role of coating processes on the corrosion kinetics and mechanism of zinc in artificial seawater". *Materials*, 14(23), 7464, 2021.

[5] Vagge ST, Raja VS, Narayanan RG. "Effect of deformation on the electrochemical behavior of hot-dip galvanized steel sheets". *Applied Surface Science*, 253(20), 8415-8421, 2007.

[6] ArcelorMittal Europe. "Corrosion Protection of Rolled Steel Sections Using Hot-Dip Galvanization". https://sections.arcelormittal.com/repository2/Sections/10_Corrosion%20protection/5_10_02_Corrosion_EN.pdf (10.08.2024).

[7] Ploypech S, Boonyongmaneerat Y, Jearanaisilawong P. "Crack initiation and propagation of galvanized coatings hot-dipped at 450 C under bending loads". *Surface and Coatings Technology*, 206(18), 3758-3763, 2012.

[8] Okafor IC, O'Malley RJ, Prayakarao KR, Aglan HA. "Effect of zinc galvanization on the microstructure and fracture behavior of low and medium carbon structural steels". *Engineering,* 5(8), 656-666, 2013.

[9] Camurri PC, Benavente GR, Roa SI, Carrasco CC. "Deformation and fatigue behavior of hot dip galvanized coatings". *Materials Characterization*, 55(3), 203-210, 2005.

[10] Oyewole O, Smart P, Ajani D, Olorunfemi JB. "Effect of corrosion on surface degradation of galvanized steel in poultry dung, pig dung and urea solutions using rice straw as an inhibitor". *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 30, 95-102, 2021.

[11] Dülger M. Investigating the Effect of Mechanical Processes on Corrosion Behavior in Galvanized DX51 and DX52 Quality Steels. MSc Thesis, Balıkesir University, Balıkesir, Türkiye, 2024.

[12] Korkmaz AH, Sürücü A, Horuz A. "The utilization of rw-watered poultry manure as organic fertilizer in the agriculture". *Journal of Faculty of Agriculture, Ondokuz Mayıs University*, 11(2), 117–125, 1996.

[13] Moreira VB., Krummenauer A, Ferreira JZ, Veit HM, Armelin E, and Meneguzzi A, "Computational image analysis as an alternative tool for the evaluation of corrosion in salt spray test". *Studia UBB Chemia*, LXV, 3, 45-61, 2020.

[14] Elewa RE, Afolalu SA, Fayomi OSI. "Overview production process and properties of galvanized roofing sheets". *Journal of Physics: Conference Series* 1378, 022069, 2019.

[15] Haiducu M, Ghiban B, Ghiban N, Miculescu F, "Corrosion resistance of some zinc galvanizing steels". *University Politehnica of Bucharest Scientific Bulletin, Series B,* 75(3), 153-164, 2013.

[16] Liu Q, Cao Y, Chen S, Xu X, Yao M, Fang J, Lei K, and Liu G, "Hot-dip galvanizing process and the influence of metallic elements on composite coatings". *Journal of Composite Science,* 8(5), 160, 2024.

[17] Hernandez-Alvarado LA, Hernandez LS, and Rodriguez-Reyna SL. "Evaluation of corrosion behavior of galvanized steel treated with conventional conversion coatings and a chromate-free organic inhibitor". *International Journal of Corrosion*, 2012(1), 368130, 2012.

[18] Karakaş Ö, Kanca E, Aydın Z. "Examination of the effects of the use of passivation agents and protective oils on corrosion formation". *International Iron & Steel Symposium*, Karabük, Türkiye, 2-4 April 2012.

[19] Vourlias G, Pistofidis N, Stergioudis G, Pavlidou E, and Tsipas D, "Influence of alloying elements on the structure and corrosion resistance of galvanized coatings". *Physica Status Solidi,* 201(7), 1518–1527 2004.

[20] Yang WJ, Yang P, Li XM and Feng WL. "Influence of tensile stress on corrosion behaviour of high strength galvanized steel bridge wires in simulated acid rain". *Materials and Corrosion*, 63(5), 401-407, 2012.

Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 31(7), 1125-1131, 2025

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

The role of welding parameters in enhancing joint strength and durability for AISI 1040 and 316 steels

AISI 1040 ve 316 çeliklerinde birleşim dayanımı ve dayanıklılığın artırılmasında kaynak parametrelerinin rolü

Yalçın Yaşar[1], *İbrahim Aslan*[2], *Halil Burak Kaybal*[3], *Harun Yaka*[4*]

[1]Vocational and Technical Anatolian High School, Metal Technology, Tokat, Türkiye.
yalcin_yasar@hotmail.com

[2]Motor Vehicles and Transportation Technologies, Taşova Yüksel Akın Vocational School, Amasya University, Amasya, Türkiye.
ibrahim.aslan@amasya.edu.tr

[3]Industrial Design, Faculty of Fine Arts, Kırıkkale University, Kırıkkale, Türkiye.
hburak@kku.edu.tr

[4]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Amasya University, Amasya, Türkiye.
harun.yaka@amasya.edu.tr

Received/Geliş Tarihi: 23.01.2025 Revision/Düzeltme Tarihi: 07.04.2025 doi: 10.5505/pajes.2025.74611
Accepted/Kabul Tarihi: 14.04.2025 Research Article/Araştırma Makalesi

Abstract

This study evaluates the effects of welding parameters, particularly amperage, on the mechanical properties and microstructures of AISI 1040 and AISI 316 steels joined using Electric Arc Welding (EAW), Metal Inert Gas (MIG), and Tungsten Inert Gas (TIG) welding techniques. Experimental samples were subjected to tensile, bending, and microhardness tests, followed by microstructural analysis using optical microscopy. The results showed that welding amperage significantly influences tensile and bending strengths, as well as hardness values. For AISI 1040 steel, TIG welding at 100 amperes achieved the highest tensile strength (543 MPa) and bending strength (181 N), while EAW at 70 amperes exhibited the lowest values. For AISI 316 stainless steel, MIG welding at 70 amperes yielded the highest tensile strength (491 MPa), and EAW at 90 amperes demonstrated the highest bending strength (150 N). Microhardness analysis indicated that rapid cooling in surface regions increased hardness. Microstructural examination revealed grain refinement and uniformity at optimal amperages, contributing to improved mechanical properties. The study underscores the importance of selecting appropriate welding parameters to enhance joint performance and weld quality.

Keywords: Welding parameters, AISI 1040 steel, AISI 316 stainless steel, Mechanical properties, Microstructural analysis.

Öz

Bu çalışma, kaynak parametrelerinin, özellikle akım şiddetinin, Electric Arc Welding (EAW), Metal Inert Gas (MIG) ve Tungsten Inert Gas (TIG) kaynak teknikleri ile birleştirilen AISI 1040 ve AISI 316 çeliklerinin mekanik özellikleri ve mikro yapıları üzerindeki etkilerini değerlendirmektedir. Deneysel örnekler, gerilme, eğilme ve mikrosertlik testlerine tabi tutulmuş ve ardından optik mikroskopi ile mikro yapı analizi yapılmıştır. Sonuçlar, kaynak akımının, gerilme ve eğilme dayanımları ile sertlik değerlerini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. AISI 1040 çeliği için, 100 amperde yapılan TIG kaynağı en yüksek gerilme dayanımını (543 MPa) ve eğilme dayanımını (181 N) sağlarken, 70 amperde yapılan EAW kaynak işlemi en düşük değerlere sahiptir. AISI 316 paslanmaz çelik için ise, 70 amperde yapılan MIG kaynağı en yüksek gerilme dayanımını (491 MPa), 90 amperde yapılan EAW kaynağı ise en yüksek eğilme dayanımını (150 N) göstermiştir. Mikrosertlik analizi, yüzey bölgelerinde hızlı soğumanın sertliği artırdığını belirtmiştir. Mikroyapı incelemesi, optimal akım şiddetlerinde tane incelmesi ve homojenlik sağlandığını, bunun da mekanik özellikleri iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Çalışma, uygun kaynak parametrelerinin seçilmesinin, birleşim performansını ve kaynak kalitesini artırmadaki önemini vurgulamaktadır.

Anahtar kelimeler: Kaynak parametreleri, AISI 1040 çeliği, AISI 316 paslanmaz çeliği, Mekanik özellikler, Mikroyapı analizleri.

1 Introduction

Welding is a critical fabrication process utilized across various industries, with several methods frequently employed, each offering distinct applications and advantages. Among the most widely used techniques are Electric Arc Welding (EAW), Metal Inert Gas (MIG) welding, and Tungsten Inert Gas (TIG) welding. MIG welding is valued for its speed and versatility, making it suitable for thin materials and automated operations. TIG welding, on the other hand, is renowned for producing high-quality, precise welds, particularly in stainless steel and aluminum applications. Each method necessitates specific techniques and equipment, enabling welders to choose the most appropriate approach based on material properties and project requirements [1],[3].

While each welding method has its advantages, they also have disadvantages. Selecting appropriate welding parameters based on the method and material characteristics is essential. The most critical parameter in the welding process is amperage [4]. The amperage determines how much heat the welding process will create on the material and thus how strong a weld bond will be formed. Low amperages are generally used on thin materials, providing a more careful and controlled weld. High amperages are used to make stronger welds on thicker and stronger materials. If the amperage is not adjusted correctly, several negative situations may occur. If low amperages are used, insufficient heat is produced, and the welding line may be weak. The material cannot be fully melted, and a good connection cannot be achieved. High amperages can create excessive heat on the material, causing the material to burn or deform [5],[6]. Many studies have been carried out to

*Corresponding author/Yazışılan Yazar

determine the correct welding parameters. Venkatratnam and Rao (2020) examined dissimilar joints of AISI 202 and AISI 316 steels, produced using Metal Inert Gas (MIG) welding. Welding current, wire feed speed, gas flow rate, and edge preparation angle were chosen as production parameters. Tensile strength, impact strength, and maximum bending load were obtained as outputs of the study [7]. Açar et al. (2023) investigated the weldability of dissimilar stainless steels using different gas combinations with MIG welding. AISI 316 austenitic stainless steel and AISI 430 ferritic stainless steel were joined using MIG welding with various shielding gas combinations. The welded sheets underwent metallographic testing as well as hardness, tensile, and bending tests. The effects of these parameters on mechanical and microstructural properties were analyzed [8].

Ogbonna et al. (2023) used the gray-based Taguchi method to optimize multiple responses in TIG welding for AISI 1008 mild steel and AISI 316 stainless steel. The gray-integrated Taguchi optimization approach was applied to optimize welding process parameters-such as current, voltage, and gas flow rate-based on multiple performance characteristics, including ultimate tensile strength, yield strength, elongation percentage, and Vickers microhardness of the weld zone. The study identified welding current as the most critical parameter influencing multiple performance characteristics of the welded joint [9]. Ramakrishnan et al. (2021) conducted experimental research on the mechanical properties of TIG-welded dissimilar AISI 304 and AISI 316 stainless steels using 308 filler rods. But joints were created with three different current levels. The study examined the effects of welding current on TIG welding and employed various mechanical tests to control the mechanical properties of the weld. The current levels were set at 30, 45, and 60 amperes, while the corresponding voltages were 40 V, 60 V, and 80 V. Hardness and tensile tests were performed on each sample [10]. Ongun et al. (2017) studied the effects of heat treatment on the mechanical properties of AISI 1040 steel joined by electric arc and MIG welding. Tensile, three-point bending, notched impact, and hardness tests were conducted on both heat-treated and untreated samples. The tensile deformation of the untreated samples was found to be higher than that of the welded samples [11]. Adin (2024) performed a parametric study on the mechanical properties of dissimilar cylindrical steel joints of AISI 1040 and AISI 8620, welded using MIG and TIG techniques. Additionally, the fracture surfaces of the samples were examined using scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray analysis (EDAX) [12]. Sakthivel and Sivakumar (2014) investigated the effects of vibration in TIG and arc welding of AISI 316 stainless steel. Their research revealed that welding with mechanical vibrations resulted in smoother and finer-grained structures [13]. Math and Kumar (2022) qualitatively examined the effects of shielded metal gas welding techniques (MIG and TIG) on AISI 1040 steel. Parameters such as arc voltage, arc current, welding speed, nozzle-to-work distance, and gas pressure were found to significantly influence welding quality. The thickness of the support plate and the material itself also played a crucial role [14]. Ateş et al. (2017) investigated the mechanical and microstructural characteristics of AA5XXX aluminum plates connected by MIG welding. They carried out several tensile, bending, and hardness tests. Compared to the untreated material (UT), tensile strengths of 12 h and 24 h sub-zero temperature treated (CT) specimens increase substantially by 12% and 14%, respectively [15].

Improper selection of amperage in welding processes can result in suboptimal welding quality, diminished joint strength, and potential defects such as porosity, incomplete fusion, or excessive spatter. These issues not only compromise the structural integrity of the weld but also increase the likelihood of premature failure in critical applications. Therefore, determining the optimal amperage values is paramount to ensuring high-quality welds that meet both mechanical and structural performance standards. In this study, extensive experimental investigations were carried out to identify the ideal amperage values for the selected materials and welding methods. By analyzing the influence of amperage on the mechanical properties and microstructural characteristics of the welds, this research aims to provide valuable insights into parameter optimization. The findings are expected to contribute to the development of standardized practices for welding AISI steels, enhancing joint strength and durability across various industrial applications. Furthermore, this work builds upon the existing body of knowledge by addressing the interplay between amperage and other key welding parameters, ultimately paving the way for more efficient and reliable welding processes.

2 Material and methods

In this study, AISI 1040 and AISI 316 materials with dimensions of 3x150x300 mm were used. Each material was joined using Electric Arc, MIG, and TIG welding methods. For Electric Arc Welding of low-carbon steel, 3.25 mm diameter rutile electrodes were used, while for stainless steel, 3.25 mm diameter electrodes containing Cr-Ni were employed. In MIG welding of low-carbon steel, SG3 brand welding wire conforming to EN ISO 636-A W4Si1 standards with a 1 mm diameter was used. For stainless steel, welding wire conforming to EN ISO 14343-A G199 LSI standards with a 0.8 mm diameter was utilized. For TIG welding, low-carbon steel was joined using 1.6 mm diameter Mo70 filler wire, while TW308L wire was employed for stainless steel. The chemical composition of the TW308L wire was 0.45 Si, 1.70 Mn, 20 Cr, 10 Ni, and 0.15 Mo. Argon gas with a purity of 99.99% was used as a shielding gas in MIG and TIG welding. The gas flow rate was set to 10 liters per minute. Tungsten electrodes with a 1.6 mm diameter were utilized.

2.1 Welding parameters

Different current values were used in Electric Arc Welding (EAW). For both low-carbon and stainless steel, three different current levels were applied. The welding parameters for each material are detailed in Tables 1 and 2.

Table 1. Electric arc welding parameters for AISI 1040 steel.

	Amperage	Electrode Diameter (mm)	Duration (s)	Current Type
EAK70	70	3.25	100	DC
EAK80	80	3.25	90	DC
EAK90	90	3.25	85	DC

Table 2. Electric arc welding parameters for AISI 316 stainless steel.

	Amperage	Electrode Diameter (mm)	Duration (s)	Current Type
EAK70	70	3.25	100	DC
EAK80	80	3.25	90	DC
EAK90	90	3.25	87	DC

In MIG welding, different current levels were applied. Tables 3 and 4 present the parameters for low-carbon and stainless steel, respectively.

Table 3. MIG welding parameters for AISI 1040 steel.

	Amperage	Electrode Diameter (mm)	Duration (s)	Current Type
MIG70	70	1.00	98	DC
MIG80	80	1.00	93	DC
MIG90	90	1.00	84	DC

Table 4. MIG welding parameters for AISI 316 stainless steel.

	Amperage	Voltage	Electrode Diameter (mm)	Duration (s)	Current Type
MIG70	70	16	0.8	100	DC
MIG80	80	16.8	0.8	95	DC
MIG90	90	17.2	0.8	87	DC

In TIG welding, three different current levels were applied for both materials. The parameters are presented in Tables 5 and 6.

Table 5. TIG welding parameters for AISI 1040 steel.

	Amperage	Electrode Diameter (mm)	Duration (s)	Current Type
TIG80	80	1.60	245	DC
TIG90	90	1.60	240	DC
TIG100	100	1.60	237	DC

Table 6. TIG welding parameters for AISI 316 stainless steel.

	Amperage	Electrode Diameter (mm)	Duration (s)	Current Type
TIG80	80	2.00	246	DC
TIG90	90	2.00	242	DC
TIG100	100	2.00	236	DC

2.2 Tensile testing

Tensile test samples for the welded steel and stainless-steel materials were prepared in accordance with TS 5789 standards using a laser cutting unit. Samples were prepared with the dimensions specified in Figure 1. From each welded plate, three tensile test samples were extracted and tested, and the average values were determined.

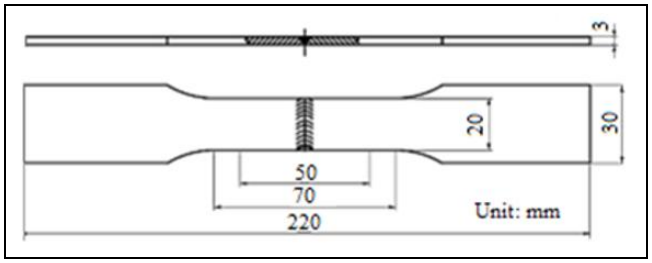


Figure 1. Dimensions of tensile test samples as per TS EN 5789 standards.

Tensile-elongation diagrams were plotted based on the parametric values of the samples. Tensile tests were conducted to evaluate the mechanical properties of the butt-welded materials and assess the influence of welding current on joint properties.

2.3 Bending testing

Samples from each material, welded under specified parameters, were subjected to bending tests using a bending test device. The tests were conducted using the three-point bending method in accordance with ASTM E190-14 standards. The procedure for the bending test is schematically presented in Figure 2.

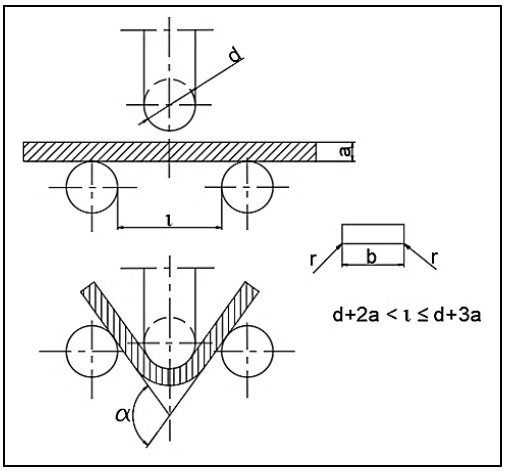


Figure 2. Schematic of bending test sample.

2.4 Microhardness testing

Hardness scans were performed on samples obtained from all welded materials using a Vickers microhardness tester. Measurements were taken starting from the base material, progressing through the HAZ (Heat Affected Zone) and weld metal, at 0.5 mm intervals. The test load was set at 50 g (HV 0.05).

2.5 Macro and microstructure analysis

Samples from the welded materials were mounted in bakelite to facilitate handling. They were sequentially ground with 60, 200, 400, 600, 800, and 1200 grit sandpapers under water, changing the sanding direction at each stage. The polished samples were further refined with alumina powder on a felt cloth. After washing with water, the samples underwent electrolytic etching. The welded surfaces of the prepared samples were examined under a Nikon microscope, as shown in Figure 3.



Figure 3. The image of the Nikon Eclipse L150A optical microscope.

3 Results and discussion

3.1 Tensile test results

The tensile test samples, having been subjected to different welding currents, exhibited varying mechanical properties and elongation values. In the study, AISI 1040 steel joined using EAW (Electric Arc Welding) at 70 amperes for 100 seconds

experienced insufficient heat input, leading to inadequate fusion and fracture in the weld zone. At 80 and 90 amperes, fusion improved significantly. Among the samples, the one welded at 80 amperes demonstrated the highest tensile strength. For MIG welding of AISI 1040 steel at 70 amperes for 98 seconds, inadequate heat input led to insufficient fusion and failure in the weld zone. Similar results were observed at 80 amperes. However, at 90 amperes for 84 seconds, fusion was easier, resulting in higher tensile strength. In TIG welding of AISI 1040 steel at 80 amperes for 245 seconds, insufficient heat input caused inadequate fusion and tearing in the weld zone. The sample welded at 90 amperes fractured in the weld zone. However, at 100 amperes for 237 seconds, fusion was achieved more effectively, yielding higher tensile strength. The tensile test results of AISI 1040 steel joined using EAW, MIG, and TIG at different currents are presented in Figure 4.

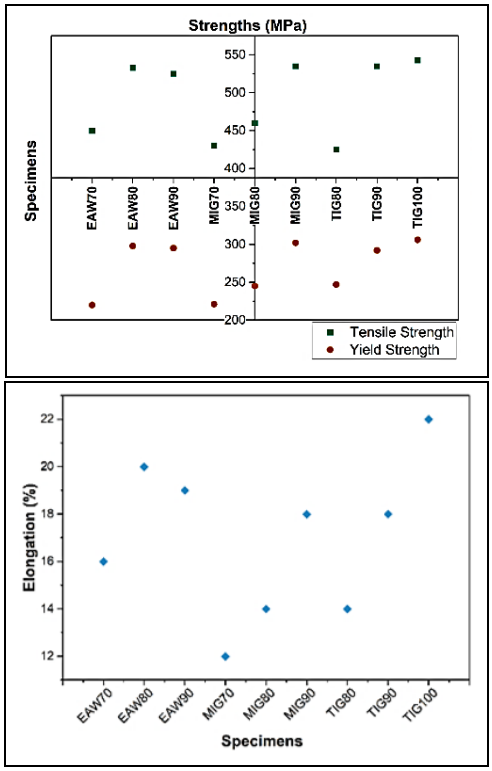


Figure 4. Tensile test results for AISI 1040.

For AISI 316 stainless steel, EAW at 70, 80, and 90 amperes resulted in insufficient heat input, leading to inadequate fusion and weld zone failure. However, samples welded at 80 and 90 amperes exhibited higher tensile strength. In MIG welding, the sample joined at 70 amperes for 100 seconds showed higher tensile strength compared to those joined at higher currents. Despite improved fusion with increasing current, the lower tensile strength in some cases may be attributed to chromium carbide precipitation. Similarly, in TIG welding, the sample joined at 80 amperes for 246 seconds exhibited higher tensile strength compared to those welded at higher currents. Chromium carbide precipitation, resulting from rapid cooling post-welding, could explain the lower tensile strength. To mitigate this, welded materials were cooled in room-temperature water immediately after welding. The tensile test results of AISI 316 stainless steel joined using EAW, MIG, and TIG at different currents are shown in Figure 5.

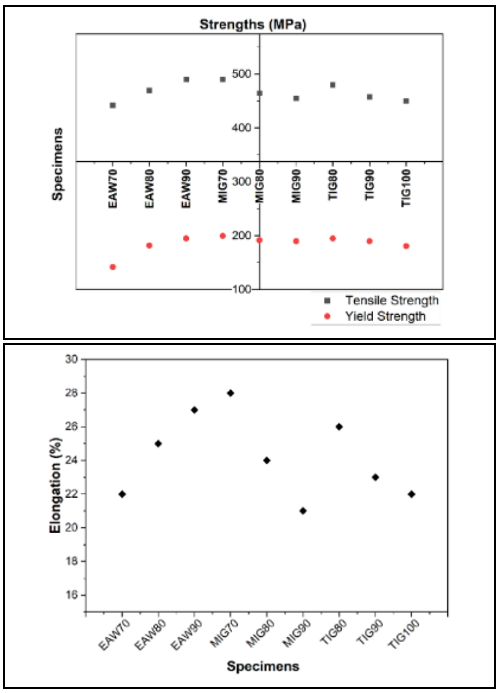


Figure 5. Tensile test results for AISI 316.

4 Bending test results

The bending test results for AISI 1040 and AISI 316 stainless steel joined using EAW, MIG, and TIG at three different currents are shown in Figure 6. For AISI 1040 steel, the highest compressive force in EAW and MIG welding was obtained at 80 amperes. In TIG welding, the maximum compressive force was achieved at 100 amperes. The maximum displacement occurred at 90 amperes for EAW and MIG welding, while for TIG welding, it occurred at 100 amperes.

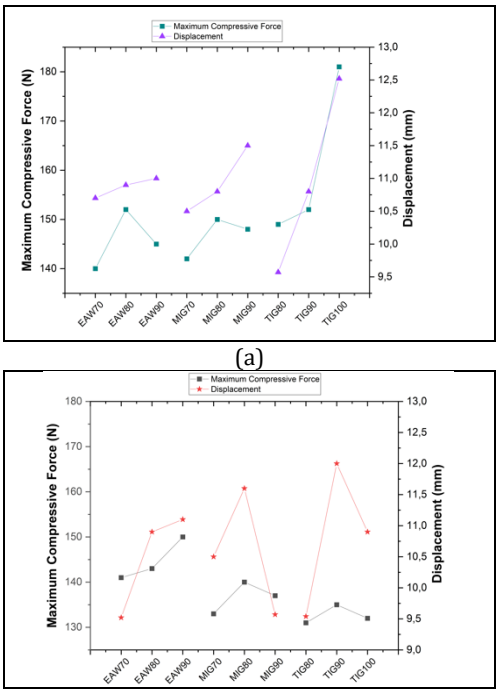


Figure 6. Bending test results for (a): AISI 1040. (b): AISI 316.

For AISI 316 stainless steel, the highest strength was observed in samples welded at 90 amperes using EAW and TIG. In contrast, for MIG welding, the maximum compressive force was achieved at 80 amperes. The maximum displacement occurred at 90 amperes for EAW and at 80 amperes for MIG and TIG welding.

4.1 Microhardness test results

Microhardness tests were conducted on samples obtained from all welded parts using a Vickers microhardness tester. Measurements were taken from the base material, HAZ (Heat Affected Zone), and weld metal at 0.5 mm intervals. The test load was set at 50 g (HV 0.05).

The hardness measurement points on the cross-section of the weld zone are shown in Figure 7. The microhardness values for AISI 1040 steel welded using EAW, MIG, and TIG at different currents are presented in Figure 8.

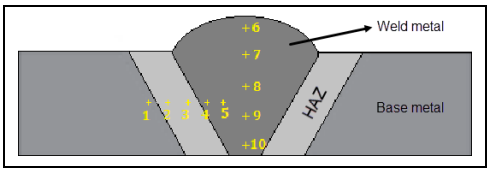


Figure 7. Hardness measurement points.

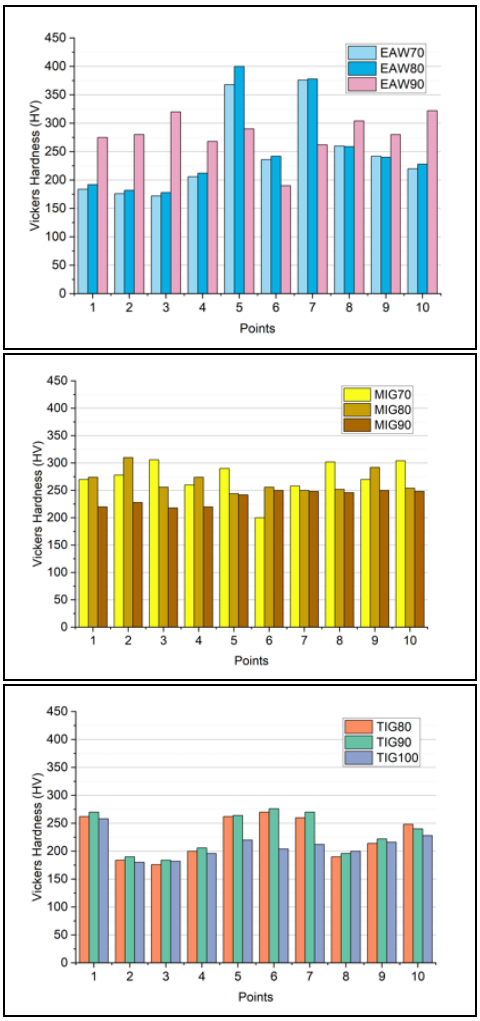


Figure 8. Microhardness values of AISI 1040 steel joined using EAW, MIG, and TIG at different current levels.

For EAW, the highest hardness value of 400 kg/mm^2 was observed at point 5 of the sample welded at 80 amperes. In MIG welding, the highest hardness value of 310 kg/mm^2 was observed at point 2 of the sample welded at 80 amperes. In TIG welding, the highest hardness value of 275 kg/mm^2 was recorded at point 6 of the sample welded at 90 amperes. Since point 6 is on the top surface, higher hardness due to rapid cooling is acceptable [16]. The results showed that the base metal had lower hardness values compared to HAZ and weld metal.

The hardness values obtained from welding AISI 316 stainless steel using EAW, MIG, and TIG methods at different current levels are presented in Figure 9. In EAW and MIG welding, the hardest region was found at point 7. Since point 7 is close to the surface, it is normal for it to exhibit relatively higher hardness due to rapid cooling. For EAW, the highest microhardness value of 310 kg/mm^2 was recorded in the sample welded at 90 amperes. In MIG welding, the highest microhardness value was 280 kg/mm^2, also observed in the sample welded at 90 amperes. For TIG welding, the highest hardness value of 245 kg/mm^2 was measured at point 2 of the sample welded at 90 amperes.

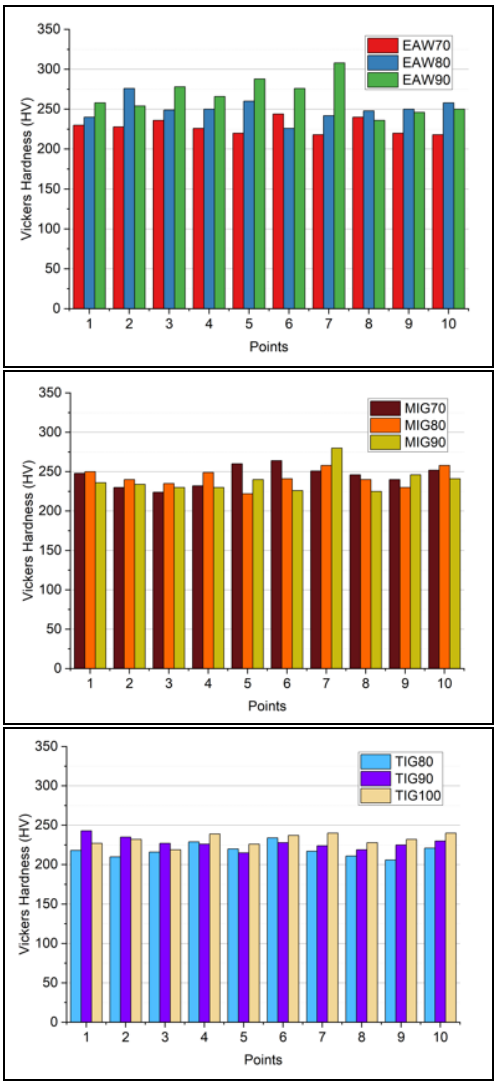


Figure 9. Microhardness values of AISI 316 steel joined using EAW, MIG, and TIG at different current levels.

4.2 Microstructure and macrostructure image analysis

Surface examinations of the weld samples were conducted using a microscope to inspect their microstructures. Images of the samples that exhibited the highest and lowest tensile and compressive strengths for AISI 1040 and AISI 316 steels are provided. The microscopic images of the weld samples are presented in Figures 10, 11, 12, and 13.

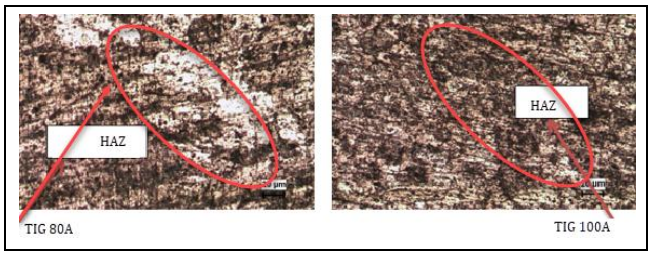


Figure 10. Tensile strength of AISI 1040; lowest in TIG 80A, highest in TIG 100A.

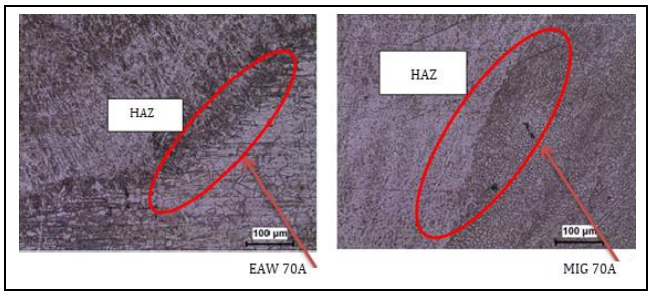


Figure 11. Tensile strength of AISI 316; lowest in EAW 70A, highest in MIG 70A.

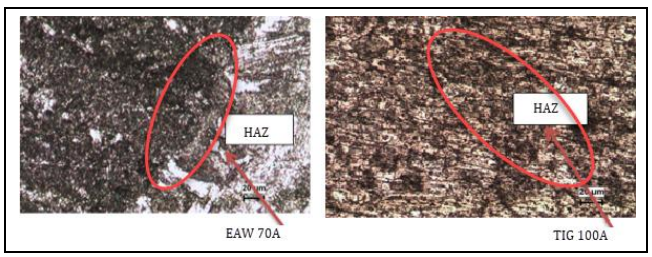


Figure 12. Bending strength of AISI 1040; lowest in EAW 70A, highest in TIG 100A.

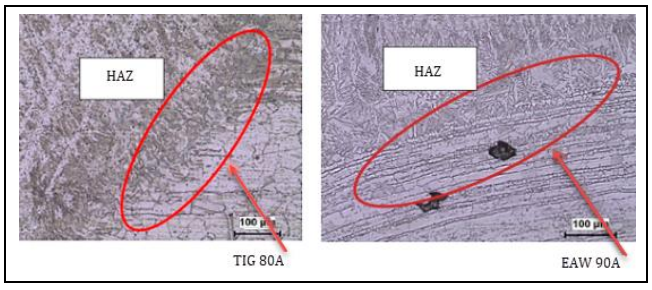


Figure 13. Bending strength of AISI 316; lowest in TIG 80A, highest in EAW 90A.

For AISI 1040 steel, the lowest tensile strength of 425 MPa was observed in the TIG weld made at 80 amperes, while the highest tensile strength of 543 MPa was achieved in the TIG weld made at 100 amperes. As shown in Figure 10, the grain size of the sample welded at 100 amperes is smaller and more uniformly distributed compared to the sample welded at 80 amperes. The grain sizes of the base metal and weld metal in the 100-ampere sample are also more consistent. In contrast, grain growth was observed in the weld metal and HAZ of the 80-ampere sample. For AISI 316 stainless steel, the lowest tensile strength of 442 MPa was observed in the EAW weld made at 70 amperes, while the highest tensile strength of 491 MPa was achieved in the MIG weld made at 70 amperes.

As shown in Figure 11, the EAW weld at 70A exhibited two distinct regions within the weld metal. Near the HAZ, a more columnar grain structure was observed, while a more homogeneous grain structure was seen closer to the weld metal. The microstructure of the weld metal was found to consist of austenite and ferrite. In the MIG 70A sample, the weld metal predominantly consisted of austenite. Additionally, differences in grain orientation at the region boundaries created a distinct appearance. This structural alignment contributed to the higher tensile strength of the MIG weld. Uygur (2006) observed fine grains owing to nucleation of martensite and fine precipitates at low welding currents in his study [17].

For AISI 1040 steel, the lowest bending strength of 140 N was observed in the EAW weld made at 70 amperes, while the highest bending strength of 181 N was achieved in the TIG weld made at 100 amperes. As shown in Figure 12, the EAW 70A sample exhibited very small grains in the weld metal, which progressively grew toward the HAZ and base metal. This variation in the microstructure resulted from the heat's influence as it dissipated from the weld point toward the base metal [18],[19]. These differences in grain size contributed to the lower bending strength. In the TIG 100A sample, better cooling resulted in finer grains in the weld metal compared to the other samples, leading to the highest bending strength for AISI 1040 steel in the TIG 100A sample. For AISI 316 stainless steel, the lowest bending strength of 131 N was recorded in the TIG weld made at 80 amperes, while the highest bending strength of 150 N was observed in the EAW weld made at 90 amperes. In the TIG 80A sample, the weld metal was predominantly composed of austenite with large grains. In the EAW 90A sample, although austenite was still predominant, the microstructure also included austenite + ferrite. Additionally, the grains in the EAW 90A sample were smaller, which contributed to its higher bending strength.

5 Conclusions

The study comprehensively examined the influence of welding parameters, particularly amperage, on the mechanical properties and microstructures of AISI 1040 and AISI 316 steels joined using Electric Arc Welding (EAW), Metal Inert Gas (MIG), and Tungsten Inert Gas (TIG) welding techniques. The findings demonstrated that for tensile strength, AISI 1040 steel achieved its highest value (543 MPa) with TIG welding at 100 amperes, while the lowest value (425 MPa) was observed with TIG welding at 80 amperes. Similarly, for AISI 316 stainless steel, the highest tensile strength (491 MPa) was attained with MIG welding at 70 amperes, whereas EAW welding at 70 amperes exhibited the lowest tensile strength (442 MPa). Regarding bending strength, TIG welding at 100 amperes resulted in the highest value (181 N) for AISI 1040 steel, while EAW welding at 70 amperes yielded the lowest (140 N). In AISI 316 stainless steel, the highest bending strength (150 N) was recorded with EAW welding at 90 amperes, and TIG welding at 80 amperes exhibited the lowest (131 N). For microhardness, AISI 1040 steel showed the highest value (400 kg/mm^2) in EAW welding at 80 amperes, while AISI 316 stainless steel achieved its peak

microhardness (310 kg/mm^2) with EAW welding at 90 amperes. Microstructural analysis revealed that grain refinement and uniform distribution, particularly in TIG welding at optimal amperages, contributed to superior mechanical properties, whereas rapid cooling in surface regions caused localized increases in hardness. These results underscore the pivotal role of welding parameters, particularly amperage and cooling conditions, in determining the mechanical and microstructural quality of welded joints, emphasizing the importance of parameter optimization to enhance weld performance.

6 Author contribution statement

Yalçın Yaşar contributed to the welding processes and experimental procedures. İbrahim Aslan was responsible for the literature review. Halil Burak Kaybal evaluated the results, performed the manuscript review, and oversaw the overall supervision of the study. Harun Yaka contributed to the manuscript writing and its final review. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

7 Ethics committee approval and conflict of interest statement

"There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared".

"There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared".

8 Nomenclature

EAW	:	Electric arc welding,
MIG	:	Metal inert gas,
TIG	:	Tungsten inert gas,
HAZ	:	Heat-affected zone.

9 References

[1] Den Ouden G, Hermans M. *Welding Technology*. 1th ed. Delft, Netherlands, VSSD, 2009.

[2] Messler Jr RW. *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*. 2nd ed. Singapore, John Wiley & Sons, 2024.

[3] Kah P, Latifi H, Suoranta R, Martikainen J, Pirinen M. "Usability of arc types in industrial welding". *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 9(15), 1-12. 2014.

[4] Apay S. "Optimization of welding parameters in MAG lap welding of DD13 sheet metal with taguchi method and FEM analysis". *Manufacturing Technologies and Applications*, 3(3), 20-30, 2022.

[5] Uygur I, Dogan I. "The effect of TIG welding on microstructure and mechanical properties of a butt-joined-unalloyed titanium". *Metalurgija,* 44(2), 119-123, 2005.

[6] Uygur I, Gulenc B. "The effect of shielding gas compositions for MIG welding process on mechanical behavior of low carbon steel". *Metalurgija,* 43(1), 35-40, 2004.

[7] Venkatratnam D, Kesava Rao VVS. "Effect of MIG welding parameters on mechanical properties of dissimilar weld joints of AISI 202 and AISI 316 steels". *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology,* 13(2), 51-64, 2020.

[8] Açar I, Çevik B, Gülenç B. "Weldability of dissimilar stainless steels by MIG welding with different gas combinations". *Sādhanā*, 48(2), 69, 2023.

[9] Ogbonna OS, Akinlabi Akinlabi S, Madushele N, Fatoba OS, Akinlabi ET. "Multi-response optimization of TIG dissimilar welding of AISI 1008 mild steel and AISI 316 stainless steel using grey-based Taguchi method". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126(1-2), 749-758, 2023.

[10] Ramakrishnan A, Rameshkumar T, Rajamurugan G, Sundarraju G, Selvamuthukumaran D. "Experimental investigation on mechanical properties of TIG welded dissimilar AISI 304 and AISI 316 stainless steel using 308 filler rod". *Materials Today: Proceedings*, 45, 8207-8211, 2021.

[11] Ongun A, Uzun İ, Turgut OK. "Investigation of mechanical properties AISI 1040 steel welding with electric arc and MIG, applied various heat treatments". *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 23(1), 1-5, 2017.

[12] Adin MŞ. "A parametric study on the mechanical properties of MIG and TIG welded dissimilar steel joints". *Journal of Adhesion Science and Technology*, 38(1), 115-138, 2024.

[13] Sakthivel P, Sivakumar P. "Effect of vibration in TIG and arc welding using AISI316 stainless steel". *International Journal of Engineering. Research and Science. & Technology*, 3(4), 116-130, 2014.

[14] Math P, Praveen Kumar BS. "Optimization of Gas Metal Arc Welding Process Parameters on Structural Steel Plates by Taguchi Method". *Journal of Mines, Metals and Fuels,* 70(10A), 254-259, 2022.

[15] Ates H, Tamer Ozdemir A, Uzun M, Uygur I. "Effect of deep sub-zero treatment on mechanical properties of AA5XXX aluminum plates adjoined by MIG welding technique". *Scientia Iranica*, 24(4), 1950-1957, 2017.

[16] Silwal B, Li L, Deceuster A, Griffiths B. "Effect of postweld heat treatment on the toughness of heat-affected zone for grade 91 steel". *Welding Journal,* 92(3), 80-87, 2013.

[17] Silwal B, Li L, Deceuster A, Griffiths B. "Effect of postweld heat treatment on the toughness of heat-affected zone for grade 91 steel". *Welding Journal,* 92(3), 80-87, 2003.

[18] Uygur I. "Microstructure and wear properties of AISI 1038 H steel weldments". *Industrial Lubrication and Tribology*, 58(6), 303-311, 2006.

[19] Uygur I. "Influence of shoulder diameter on mechanical response and microstructure of FSW welded 1050 Al-alloy". *Archives of Metallurgy and Materials*, 57(1), 53-60, 2012.

Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 31(7), 1132-1142, 2025

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Gündüz nişangâhı oküler gövdesinin ağırlığını azaltmak için tasarımının değiştirilmesi ve AlSi10Mg alaşımı ile eklemeli imalatı

Changing the design of the day sight ocular body to reduce its weight and additive manufacturing with AlSi10Mg alloy

Cem Ertek[1*], *Ramazan Evrensel*[2]

[1]İmalat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, Türkiye.
cemertek@cumhuriyet.edu.tr

[2]Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, Türkiye.
ramazanevrensel@hotmail.com

Received/Geliş Tarihi: 05.08.2024 Revision/Düzeltme Tarihi: 16.01.2025 doi: 10.5505/pajes.2025.76709
Accepted/Kabul Tarihi: 14.04.2025 Research Article/Araştırma Makalesi

Öz

Bu çalışmada, eklemeli imalat yöntemleri ile alüminyum alaşımlarının savunma sanayiindeki kullanımına odaklanılmış ve ASELSAN envanterindeki bir gündüz nişangâhı oküler gövdesinin tasarımı değiştirilerek ağırlığı azaltılmıştır. Mevcut oküler gövde Al7075-T6 malzemeden geleneksel talaş kaldırma yöntemleri ile imal edilmiştir. Eklemeli imalat yöntemi kullanılarak yeni bir oküler gövde üretmek için oküler gövdenin dış ölçülerini koruyarak tasarımında ve malzemesinde değişiklikler yapılmıştır. Tasarımı değiştirilen ve LPBF yöntemi ile imal edilen yeni oküler gövde için Al7075 malzemeye göre daha iyi kaynak edilebilir özellik gösteren AlSi10Mg malzemesi tercih edilmiştir. Mevcut ve yeni tasarım oküler gövdeler, aynı sınır şartları ve yüklemeler altında sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Ağırlık azaltmaya yönelik çalışmalar sonucunda, yeni oküler gövde mevcut oküler gövdeye göre ~%16 daha hafiftir. Yeni oküler gövdeye yapılan zamana bağlı sıcaklık analizi sonucunda, pim çevresindeki toplam deformasyon değeri mevcut oküler gövdeye kıyasla ~%18 artmış; eşdeğer gerilme değeri malzemelerin akma dayanımlarındaki farktan dolayı ~%62 oranında azalmıştır. Titreşim altında hasar analizi sonuçları incelendiğinde, yeni oküler gövdenin hasar oranı (1.447×10^{-32}), mevcut oküler gövdeninkine (2.061×10^{-8}) kıyasla çok daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlar, yeni tasarıma sahip oküler gövdede güvenlik faktörü değerinde iyileşme olduğunu, ancak deformasyon değerinde bir artış görüldüğünü ortaya koymuştur.

Anahtar kelimeler: Eklemeli imalat, Alüminyum alaşımları, Sonlu elemanlar analizi, Lazer toz yatak füzyonu.

Abstract

In this study focuses on the use of aluminum alloys in the defense industry using additive manufacturing methods, and the design of a day sight ocular body in ASELSAN's inventory was changed to reduce its weight. The existing ocular body was manufactured from Al7075-T6 material using conventional machining methods. In order to produce a new ocular body using the additive manufacturing method, changes were made to the design and material of the ocular body while preserving its external dimensions. For the new ocular body, which was redesigned, and manufactured using the LPBF method, AlSi10Mg material, which has better weldability than Al7075 material, was preferred. The existing and new design ocular bodies were analyzed using the finite element method under the same boundary conditions and loadings. As a result of weight reduction studies, the new ocular body is ~16% lighter than the existing ocular body. As a result of the time-dependent temperature analysis performed on the new ocular body, the total deformation value around the pin increased by ~18% compared to the existing ocular body; The equivalent stress value decreased by ~62% due to the difference in yield strength of the materials. When the results of the damage analysis under vibration were examined, it was observed that the damage rate of the new ocular body (1.447×10^{-32}) was much lower than that of the existing ocular body (2.061×10^{-8}). The results showed that there was an improvement in the safety factor value in the new designed ocular body, but an increase in the deformation value.

Keywords: Additive manufacturing, Aluminum alloys, Finite element analysis, Laser powder bed fusion.

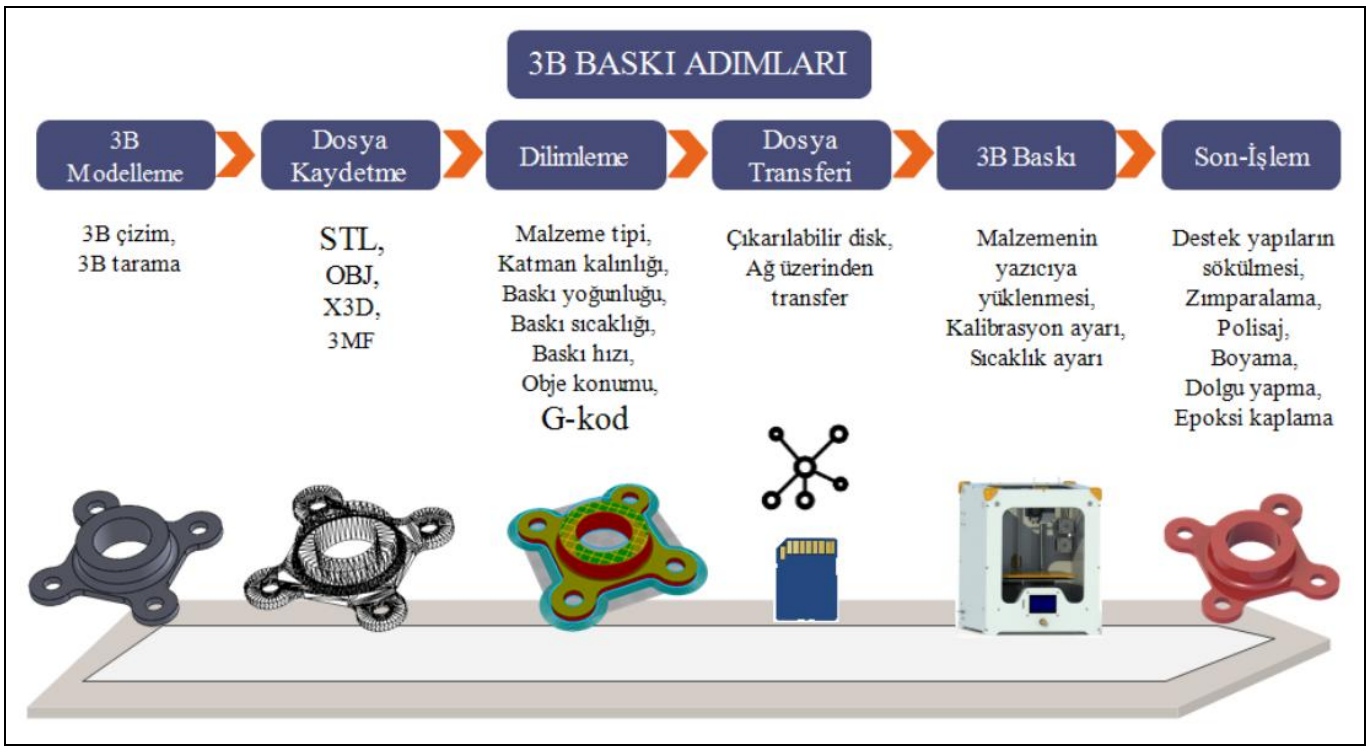
1 Giriş

Nesnelerin, bilgisayar ortamında hazırlanan üç boyutlu (3B) dijital modellerinden elde edilen verilerine göre metal, seramik ve plastik malzemeler kullanılarak katman katman imal edilmesi prensibine dayanan yöntemler, eklemeli imalat teknolojilerini oluşturur. Günümüzde bu yöntemler, enerji, yapı sektörü, sanat, medikal, otomotiv, havacılık ve uzay endüstrilerinde giderek daha fazla kullanılmaktadır. Bu teknolojiler, parçaların bir bütün halinde karmaşık geometrili imalatını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda kaynak veya montaj gibi ek işlemlere gerek kalmadan iç boşluklu yapılar oluşturarak ağırlığı azaltma gibi avantajlar da sunar.

Otomotiv, savunma, havacılık ve uzay endüstrilerinde hafiflikleri nedeniyle sıkça tercih edilen alüminyum ve alüminyum alaşımları, eklemeli imalatta kullanılan toz malzemeler arasında yer alır.

Herhangi bir parçanın eklemeli imal (Eİ) edilmesinde ana unsur, bilgisayar destekli tasarımın ardından modelin parametrelerine uygun olarak ürünün katman katman oluşturulmasıdır. Bu süreçte taramanın mesafesi, yönü, hızı, lazerin gücü, katmanın kalınlığı, kullanılan malzemeler ve imalat şekli gibi faktörler, üretilen parçanın yüzey kalitesini, imalat maliyetini, imalat hızını ve mekanik özelliklerini etkiler [1],[2]. Eklemeli imalat uygulamalarının genel işlem adımları, Şekil 1'de gösterilen akışa benzer şekilde uygulanmaktadır [1],[2].

*Corresponding author/Yazışılan Yazar



Şekil 1. Eklemeli imalatta işlem adımları [3].

Figure 1. Process steps in additive manufacturing [3].

2 Eklemeli imalatta kullanılan alüminyum alaşımları

Son on yılda, eklemeli imalat ile ilgili bilimsel yayınların sayısında önemli bir artış olmuştur. Metal eklemeli imalat alanında genel olarak; paslanmaz çelik, Ti6Al4V, Inconel 625, Inconel 718 ve AlSi10Mg en çok incelenen malzemelerdir. Alüminyum alaşımları, eklemeli imalatın ana türlerinden biri olan, seçici lazer ergitme (SLM) veya toz yatak füzyonu-lazer ışını (PBF-LB) olarak da bilinen lazerle toz yatağında ergitme yönteminde (LPBF) kullanılırlar [4],[5].

Havacılık ve otomotiv endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan Al alaşımları arasında, daha yüksek süneklik sunan yüksek mukavemetli 2xxx, 5xxx, 6xxx ve 7xxx serileri yer alır. Ancak, bu alaşımların LPBF ile işlenebilirlikleri henüz istenilen seviyede değildir. İşlemle ilgili yüksek soğuma hızları söz konusudur. Parçaların imalat sürecinde maruz kaldığı karmaşık termal değişimler, kendi kendini dengeleyen yüksek bir kalıntı gerilime yol açar. Alaşımın mukavemeti kalıntı gerilmeden daha az olduğunda, çatlakların oluşması ve yayılması yoluyla parçadaki kalıntı gerilim serbest bırakılır. Sonuç olarak imalat sırasında mikro çatlak oluşma eğilimi görülür, bu da parçalarda yapısal bütünlüğün zayıflamasına neden olur [6]-[8].

Literatürde, LPBF için yeni alaşımlara yönelik çalışmalar yürütülmektedir. Örneğin, Airbus grubu, Eİ için özel bir Al-Mg-Sc alaşımı (SCALMALLOY®RP) geliştirmiştir. Bu alaşım, yüksek korozyon direnci, yüksek özgül mukavemet, olağanüstü yorulma ve tokluk özellikleriyle bilinmektedir. Addalloy™ gibi yeni bileşimler geliştirmek için Al-Mg alaşımına Sc ve Zr eklenmesi, mikro yapıyı iyileştirmiş ve malzemeyi güçlendirmiştir. Ayrıca Sc, sıcak çatlama olasılığını azaltarak kaynak kabiliyetini geliştirmiştir [6]. Alüminyum Derneği ise eklemeli imalatta kullanılan alüminyum tozu miktarındaki büyümeyi göz önünde bulundurarak, özellikle alüminyum alaşım tozları için Purple Sheets olarak bilinen bir alaşım kayıt sistemi geliştirmiştir. 2019 yılında Purple Sheets kapsamında kayıt altına alınan ilk alüminyum tozları, HRL Laboratuvarları tarafından LPBF için geliştirilen ve 7A75.50, 7A75.51, 7A77.50 ve 7A77.51 olarak adlandırılan yüksek dayanımlı birkaç 7xxx alaşımıydı. Günümüzde Purple Sheets kapsamında bulunan ve imalatta kullanılan alaşımların artan sayısı, eklemeli imalat için çok çeşitli alüminyum alaşımlarına olan talebin kanıtıdır [4].

Alüminyum tozları, doğaları gereği hafiftir, yüksek yansıtıcılığa, yüksek ısıl iletkenliğe sahiptir. Yapılan araştırmalarda tozun akış özelliklerinin yüksek sıcaklık ve düşük nem koşullarında korunduğu görülmüştür [9]. AlSi10Mg alaşımı yüksek ısı yansıtıcılığı nedeniyle yüksek yoğunluklu parçalar imal etmek için diğer malzemelere göre daha fazla enerji girdisi gerektirir [10]. Alüminyum ve alaşımları ısıl gerilmeleri azaltan ve yüksek ısıl iletkenliğe sahiptir. Günümüzde en yaygın kullanılan alaşımlar AlSi10 Mg ve AlSi12Mg bulunmaktadır [11]. LPBF'de geleneksel olarak kullanılan fiber lazerlerin (sürekli veya modüle edilmiş) dalga boyu aralığında (1.06 μm) düşük lazer emiciliği sergilediği görülmüştür. Dolayısıyla Al alaşımlarını, LPBF ile işlemek kolay değildir. LPBF ile işlenebilirlik açısından ümit verici olanlar genellikle alüminyum döküm alaşımlarıdır. Bunların arasında en çok ilgi gören AlSi10Mg'dur ve ardından AlSi12 gelir. Al-Si alaşımları içerdikleri Si oranına göre adlandırılır ve 577 °C'de %12.5-12.6 silisyum içeriği ile bir ötektik alaşım meydana getirir. Silisyum, ergimiş alüminyumun akışkanlığını artırırken soğuma sırasında büzülmesini de azaltır. Al-Si alaşımının dökülebilirliği, silisyum içeriği ile doğru orantılıdır ve yaklaşık %17 Si değerinde en iyi seviyeye gelir.

Al-Si alaşımlarının çekme mukavemetleri 140-260 MPa aralığındadır ve süneklikleri düşüktür (~%4) [6]. Alaşımdaki Si ağırlıkça %11-13 arasında ise ötektik, %11'den az ise hipoötektik ve %13'ten fazla olduğunda hiperötektik alaşım kabul edilir [15]. AlSi10Mg alaşımı ise hipoötektik alüminyum alaşımları grubuna dahildir.

2.1 Al7075

7075 en çok, uçak parçaları gibi yüksek gerilmeli yapısal parçalarda kullanılır ve yaygın kullanılan bazı yapısal çeliklerden daha güçlüdür [12]. Örneğin, ASTM standardı B209-14'e göre işlenmiş Al7075-T6 için çekme dayanımı 530 MPa'yi aşarken, uzama değeri %9'u geçer. Ancak Al7075, LPBF için zayıf işlenebilirlik gösterir çünkü düşük kaynak edilebilirliğe ve katılaşma çatlamasına karşı yüksek hassasiyete sahiptir.

Yapılan birçok araştırma, eklemeli imalat ile çatlaksız Al7075 parçaların üretiminin mümkün olduğunu ve alüminyum alaşımlarına bileşen eklendiğinde Al7075'teki katılaşma çatlaklarının önüne geçildiğini göstermiştir [13]. Al7075-T6'nın yoğunluk değeri 2.81 g/cm³'tür.

Tablo 1'de Al7075 alaşımına ait kimyasal bileşim verilmiştir [14].

Al7075-T6 malzemesi mükemmel mekanik özelliklere sahiptir. Yüksek mukavemet, tokluk ve yorulmaya karşı iyi direnç sağlamaktadır. Tipik uygulamaları arasında havacılık, otomotiv, kalıplar, dişliler, şaftlar ve yapısal çerçeve bileşenleri bulunur.

2.2 AlSi10Mg

AlSi10Mg alaşımın farklı ortamlardaki korozyon direnci üzerinde birkaç çalışma yürütülmüş, özellikle tuzlu suda korozyon direnci incelenmiştir. Isıl işlem yapılmadığında, Si ile Al arasında mikro galvanik çiftlerin oluştuğu belirlenmiştir. Bu oluşum, bileşen yüzeyinde korozyonun yayılmasını engelleyen koruyucu bir oksit film meydana getirir [15]. AlSi10Mg'un, otomotiv ve havacılık endüstrilerinde tercih edilmesinin nedeni, çok iyi dökülebilirliği, korozyon direncinin yüksekliği, hafiflik, dinamik yük taşıma kapasitesinin yüksekliği, iyi ısıl nitelikler ve sertliğinin AlMnCu, AlMg3 ve AlFeSi alaşımlara göre daha yüksek olması gibi çeşitli özellikler sergilemesidir [16]. Bu alaşım, genellikle yüksek yük taşıyacak ince duvarlı ve karmaşık geometrili döküm parçaların imalatında tercih edilir [17]. AlSi10Mg alaşımı tozlar kullanılarak LPBF ile yapılan imalat, yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının talaşlı işlenmesi ile yapılana göre daha kolaydır. Havacılık ve otomotiv endüstrilerinde ihtiyaç duyulan parçaların eklemeli imalatında, gaz atomizasyonu yöntemi ile elde edilen 20 ila 63 µm boyutlarındaki AlSi10Mg alaşımı tozu kullanılarak, başarılı sonuçlara ulaşılmaktadır.

AlSi10Mg alaşımıyla imal edilen parçalara, ısıl işlem uygulanarak mikro yapıları ve çekme özellikleri iyileştirilebilir [18]. Parçanın mekanik özelliklerini etkileyen önemli faktörler arasında, AlSi10Mg alaşımındaki ötektik Silisyumun şekli ve boyutu da yer almaktadır. Al-Si alaşımındaki magnezyum, mukavemet ve süneklik sağlayan Mg2Si fazının çökeltmesine olanak tanır [19].

AlSi10Mg alaşımının sertleştirilmesi için çözeltiye alma ısıl işlemi yapay yaşlandırma ile uygulanır. Mamullerin mekanik özelliklerini daha da iyileştirmek için platform ısıtma stratejisi, yaşlandırma sertleştirmesi etkilerine katkı sağlayabileceği düşünülmektedir [20]. Eklemeli imalat ile elde edilen AlSi10Mg alaşımı parçanın mekanik özelliklerinin döküm AlSi10Mg alaşımı parçanınkinden daha iyi değerler sergilediği gözlenmiştir [21],[22]. AlSi10Mg alaşımının kimyasal bileşimi ve mekanik test sonuçları Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmiştir [23]. AlSi10Mg'un yoğunluk değeri 2.68 g/cm³'tür.

AlSi10Mg, Eİ yöntemlerinde kullanılan en yaygın alüminyum alaşımıdır. Yüksek mukavemet, sertlik ve dinamik özelliklere sahiptir [12].

AlSi10Mg, nispeten yüksek sıcaklıklarda kullanım için uygun ve iyi korozyon direncine sahiptir. Bu özelliklerden dolayı ısı transferi gerektiren uygulamalarda kullanılmak için ideal bir malzemedir. Alüminyum malzemeden imal edilen mamullerin işlenmesi kolaydır ve iyi yüzey kalitesi elde etmek mümkündür [24],[25]. Yapısındaki silisyumun varlığı, alüminyum alaşımını saf alüminyuma göre hem daha sert hem de daha dirençli hale getirir [19],[26].

Yüksek mukavemet-ağırlık oranı sayesinde otomotiv, havacılık ve otomasyon uygulamaları, dişli kutuları, motor parçaları, ısı eşanjörleri, yüksek basınçlı borular, manifoltlar, gövdeler ve yüksek yüke maruz kalan braketler için iyi bir seçimdir.

3 Oküler gövdenin eklemeli imalata uyarlanmış tasarımı ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizi

Savunma sanayiinde uzun namlulu silahlarda kullanılan gündüz nişangâhı iç aksamının eklemeli imalata uyarlanarak ağırlığını azaltmaya yönelik yapılacak çalışma için oküler gövde seçilmiştir. Oküler gövde, Şekil 2'de verilen dürbüne montaj edilmektedir [27].

Tablo 1. Al7075 alaşımının kimyasal bileşimi.

Table 1. Chemical composition of Al7075 alloy.

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Ağırlık bileşimi maks (%)	0.4	0.5	2.0	0.3	2.9	0.28	6.1	0.2	Geri kalan

Tablo 2. AlSi10Mg tozu (% ağırlık) kimyasal bileşimi.

Table 2. Chemical composition of AlSi10Mg powder (weight %).

Element	Si	Mg	Cu	Ni	Fe	Mn	Ti	Al
Ağırlık bileşimi (%)	10	0.4	0.25	0.05	0.25	0.1	0.15	Geri kalan

Tablo 3. Çekme testleri ve Vickers sertlik ölçümlerinin sonuçları.

Table 3. Results of tensile tests and Vickers hardness measurements.

	Çekme mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HV)
AlSi10Mg (yatay)	451	4.8	127

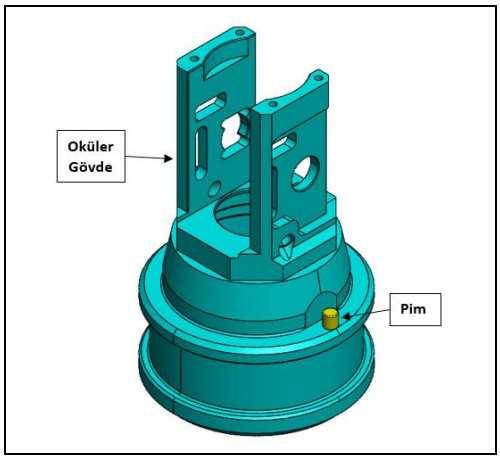


Şekil 2. A940 1x-4x gündüz nişangâhı. [27]

Figure 2. A940 1x- 4x day sight.

3.1 Mevcut parça ve yeni tasarım

Şekil 3' te verilen oküler gövde Sivas ASELSAN Hassas Optik A.Ş firmasında geleneksel talaşlı imalat yöntemleri (tornalama, frezeleme) ile imal edilmiştir. Oküler gövde, Al-7075-T6 alüminyum alaşımı gövde ve sonradan montajı gerçekleştirilen 303 paslanmaz çelik pim olmak üzere iki ayrı malzemeden oluşmaktadır. Oküler gövde ve gövdeye monte edilen pimin toplam ağırlığı 41.15 g'dır.



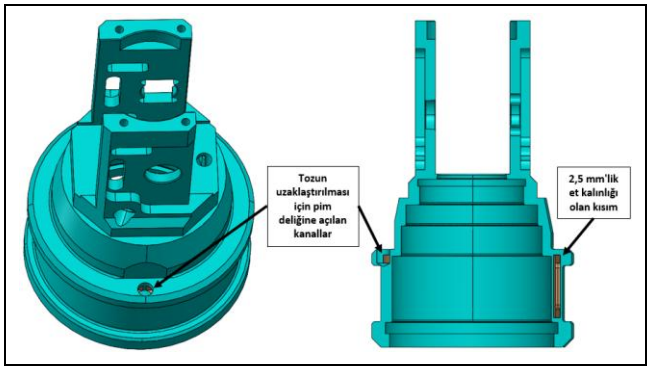
Şekil 3. Mevcut oküler gövde ve pim.

Figure 3. Existing ocular body and pin.

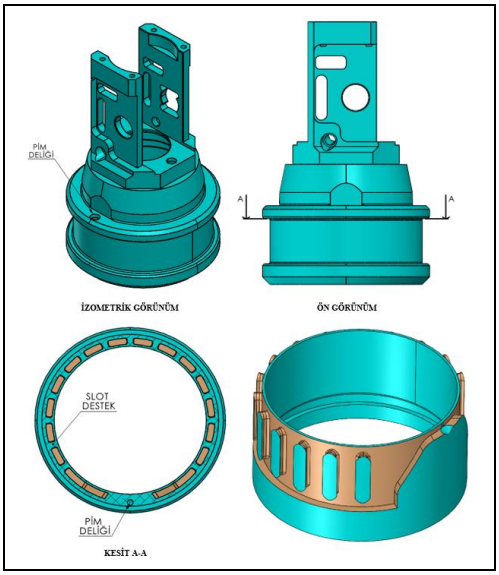
Bilindiği üzere Eİ yöntemlerinden LPBF ile imalatta, tıpkı kaynak işleminde parçaların ergitilip katılaştırılarak birleştirilmesinde olduğu gibi metal tozlarının da ergimesi ve katılaşması söz konusudur. Dolayısıyla LPBF ile imalat işleminde kullanılacak malzemenin de kaynak edilebilirliğinin iyi olması parça mukavemeti için gereklidir. Mevcut gövdenin malzemesi Al7075'nin kaynak edilebilirliği iyi olmadığından, parçanın eklemeli olarak imal edilmesinin uygun olmadığı görülmüştür. Bu nedenle LPBF ile imal edilecek yeni parça için kaynak edilebilirliği daha iyi olan AlSi10Mg malzemesi seçilmiştir.

Çalışmada, mevcut oküler gövdenin ağırlığını %10-20 oranında azaltmak hedeflenmiştir. Bu amaçla parça tasarımında değişiklik yapılmış ve yeni tasarım Şekil 4'te verilmiştir. Yeni parçanın tasarımında SolidWorks 2023 SP4 programı kullanılmıştır.

Oküler gövdenin dış formu değiştirilmeden 2.5 mm'lik et kalınlığı olan kısımdan 1.5 mm genişliğinde kanal açılmış ve her 18 derecede bir slot destekler eklenmiştir. Eİ sonrası gövde içerisinde kalan tozun uzaklaştırılması için de pim deliğine yönelik kanal açılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 4(a): Yeni tasarım oküler gövde. (b): Yeni tasarım oküler gövdenin iç kanal detayı.

Figure 4(a): New design ocular bod. (b): Internal channel detail of the new design ocular body.

Monte edildiği gündüz nişangâhına pimden yataklama yapıldığından pim deliği çevresinin ±15°' lik bölümünde ağırlık azaltımı yapılmamıştır. Yapılan değişiklik sonrası Şekil 4'te verilen yeni tasarım oküler gövde ve pimin toplam ağırlığı 34.66 g'a düşürülmüş böylece hedeflenen %10-20'lik ağırlık azaltımı gerçekleştirilmiştir.

3.2 Sonlu elemanlar yöntemi

Gerilmelere ve deformasyonlara neden olan yüklerin sonlu elemanlar yöntemi ile analizinde ağ örgüsü kalitesi önemli rol oynamaktadır. Eleman kalitesi, ortagonal kalite ve çarpıklık, sonlu elemanlar analizinde öncelikle incelenen büyüklüklerdir. Eleman kalitesi ve ortagonal kalite büyüklüklerinin 1 (bir); çarpıklık büyüklüğünün ise 0 (sıfır) kritik değerine yakın olması istenir.

Sonlu elemanlar analizinde ANSYS 2023 R1, yapısal analiz ve yapısal analiz altında ısıl koşul modülleri kullanıldı. İdeal ağ örgüsü değerlerine ulaşmak amacıyla mevcut ve yeni tasarım oküler gövdeleri ve pim ile çevresinin analizinde yararlanılan küresel bölge için lokal ağ örgüsü ayarları Tablo 4'te verilmiştir.

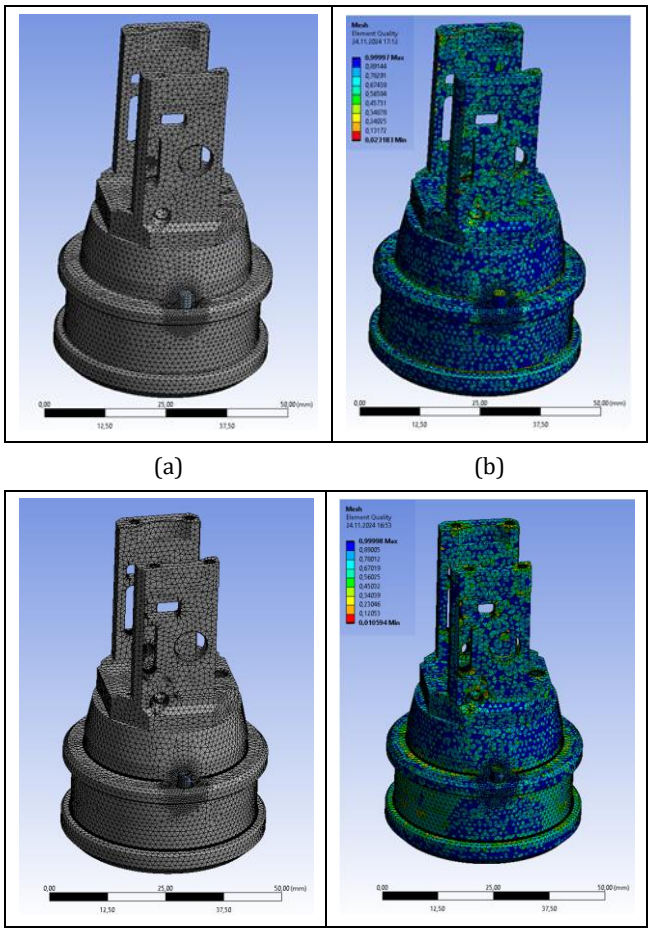
Tablo 4. Lokal ağ örgüsü ayarları.

Table 4. Local mesh settings.

Parça	Eleman sayısı	Düğüm sayısı	Eleman boyutu (mm)	
			Oküler gövde için	Pim ve çevresi için (alınan küre Ø10 mm)
Mevcut	96179	156672	1.2	0.5
Yeni tasarım	93247	158701	1.2	0.5

Yapılan çalışmada eleman kalitesinin 0.86; ortogonal kalitenin 0.75 ve çarpıklığın da 0.25 değerlerinde yoğunlaşarak istenilen 1(bir) ve 0 (sıfır) kritik değerlerine yakın oldukları görülmüştür.

Şekil 5'te mevcut ve yeni tasarım oküler gövdelere ait lokal ağ örgüsü dağılımı ile eleman kalitesi görselleri verilmiştir.



(a) (b)

(c) (d)

Şekil 5(a): Mevcut Oküler gövdenin lokal ağ örgüsü dağılımı. (b): Mevcut oküler gövdenin eleman kalitesi. (c): Yeni tasarım oküler gövdenin lokal ağ örgüsü. (d): Yeni tasarım oküler gövdenin eleman kalitesi.

Figure 5(a): Local meshwork distribution of the existing ocular body. (b): Element quality of the existing ocular body. (c): Local mesh of the new design ocular body. (d): Element quality of the new design ocular body.

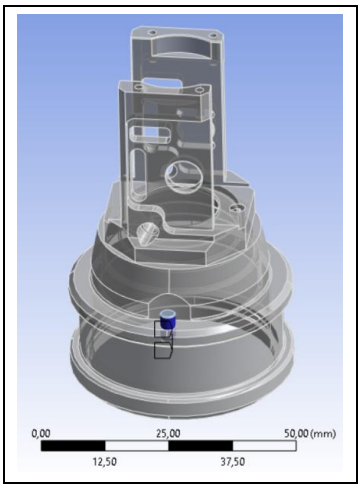
Lokal ağ örgüsü ayarları uygulandıktan sonra hem mevcut oküler gövdenin hem de yeni tasarım oküler gövdenin eleman kalitesi grafiği incelendiğinde ağ örgüsü yoğunluğunun çoğunluğu 1'e yakın, çarpıklık grafiği incelendiğinde ise ağ örgüsünün yoğunluğunun çoğunluğu 0'a yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum ideal ağ örgüsü kalitesine yaklaşıldığı anlamına gelmektedir. Ayrıca lokal ağ örgüsü ayarları sonucu düğüm ve element sayısının global ağ örgüsü ayarlarına kıyasla az olması analizin daha hızlı sonuçlanmasını sağlayacaktır.

3.3 Sıcaklık ve titreşim analizleri

Mevcut ve yeni tasarım oküler gövdeye sıcaklık ve titreşim analizleri yapılmış olup, kritik olarak belirlenen bölgede gerilme ve deformasyonlar sonlu elemanlar yöntemi aracılığıyla hesaplanmış ve uygunluğu kontrol edilmiştir.

3.3.1 Çalışma ve depolama sıcaklığı analizi

Zamana bağlı çalışma sıcaklığı analizi, oküler gövde için ASELSAN Hassas Optik A.Ş tarafından test laboratuvarlarında uygulanan koşullar dikkate alınarak, yüksek sıcaklıkta ve düşük sıcaklıkta tanımlanan süreler boyunca uygulanmıştır. Şekil 6'da sıcaklık analizi için sabitleme bölgesi verilmiştir.



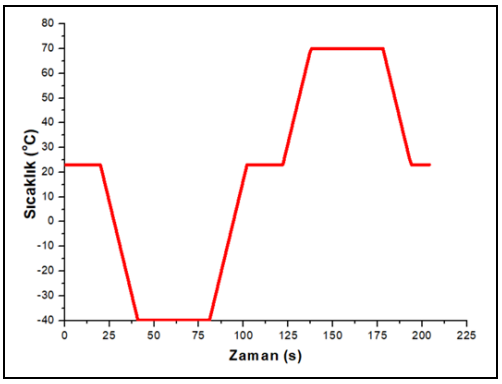
Şekil 6. Sıcaklık analizi için pimden yataklama.

Figure 6. Pin bearing for temperature analysis.

Gündüz nişangâhına pimden yataklanarak montajı gerçekleştirilen oküler gövdenin sıcaklığa maruz kalma adımları sırasıyla aşağıda verilmiştir.

- Oküler gövde 23 °C'de 1 sa. bekletildi,
- Sıcaklık dakikada 3 °C'lik adımlarla azaltılarak sıcaklığın -40 °C'ye gelmesi beklendi,
- Sıcaklık -40 °C'ye geldikten sonra 2 sa. bekletildi,
- Sıcaklık dakikada 3 °C'lik adımlarla artırılarak sıcaklığın 23 °C'ye gelmesi beklendi,
- Sıcaklık 23 °C'ye geldikten sonra 1 sa. beklendi,
- Sıcaklık dakikada 3 °C'lik adımlarla artırılarak sıcaklığın 70 °C'ye gelmesi beklendi,
- Sıcaklık 70 °C'ye geldikten sonra 2 sa. beklendi,
- Sıcaklık dakikada 3 °C'lik adımlarla azaltılarak sıcaklığın 23 °C'ye gelmesi beklendi,
- Sıcaklık 23 °C'ye geldikten sonra 20-40 dk. bekletildi.

Yukarıda belirtilen süreç adımları Şekil 7'de gösterilmiştir. Yukarıda verilen zamana bağlı sıcaklık değişimleri, ANSYS-Workbench programında 3 dk'lık periyot 1 sn'de kabul edilmiştir.



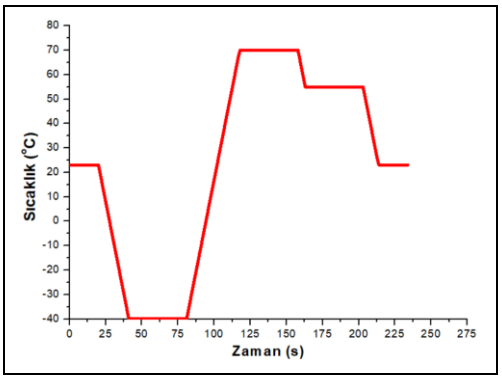
Şekil 7. Mevcut ve yeni tasarım oküler gövdenin zamana bağlı çalışma sıcaklık dağılım profili.

Figure 7. Time-dependent operating temperature distribution profile of the existing and new design ocular body.

Zamana bağlı depolama sıcaklığı analizinde oküler gövde MIL-STD-810H standardına göre yüksek sıcaklıkta ve düşük sıcaklıkta tanımlanan süre boyunca bekletilir. Gündüz nişangâhına pimden yataklanarak montajı gerçekleşen oküler gövdenin sıcaklığa maruz kalma adımları sırasıyla;

- Oküler gövde 23 °C'de 1 sa. bekletildi.
- Sıcaklık dakikada 3 °C'lik adımlarla azaltılarak sıcaklığın -40 °C'ye gelmesi beklendi.
- Sıcaklık -40 °C'ye geldikten sonra 2 sa. beklendi.
- Sıcaklık dakikada 3 °C'lik adımlarla artırılarak sıcaklığın 70 °C'ye gelmesi beklendi.
- Sıcaklık 70°C'ye geldikten sonra 2 sa. beklendi.
- Sıcaklık dakikada 3 °C'lik adımlarla artırılarak sıcaklığın 55 °C'ye gelmesi beklendi.
- Sıcaklık 55 °C'ye geldikten sonra 2 sa. beklendi.
- Sıcaklık dakikada 3 °C'lik adımlarla azaltılarak sıcaklığın 23 °C'ye gelmesi beklendi.
- Sıcaklık 23 °C'ye geldikten sonra 1 sa. bekletildi.

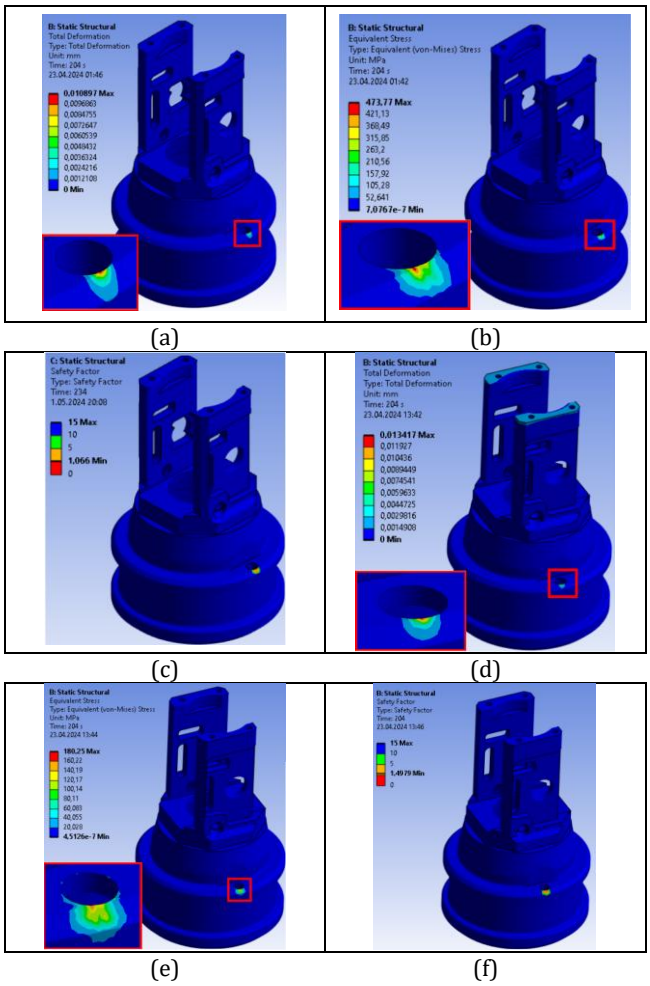
Yukarıda belirtilen adımlar Şekil 8'de gösterilmiştir. Yukarıda verilen zamana bağlı depolama sıcaklık değişimleri ANSYS programında 3 dk.'lık periyot 1 sn. kabul edilmiştir.



Şekil 8. Mevcut ve yeni tasarım oküler gövdenin zamana bağlı depolama sıcaklık dağılım profili.

Figure 8. Time-dependent storage temperature distribution profile of the existing and new design ocular body.

Yapılan zamana bağlı çalışma ve depolama sıcaklığı analizleri sonucunda minimum ve maksimumum sıcaklıkların aynı değerde olmasından dolayı pim deliği ve çevresine gelen gerilme ve gerilmelere bağlı deformasyon değerlerinin de aynı olduğu gözlemlenmiştir. Mevcut oküler gövdenin, Şekil 9(a) pim çevresinde toplam deformasyon değeri ~0.011 mm, Şekil 9(b) pim çevresindeki zamana bağlı eşdeğer gerilme değeri 473.77 MPa ve Şekil 9 (c) çevre koşulları analizinde güvenlik faktörü ~1.1 olarak hesaplanmıştır. Yeni tasarım oküler gövdenin, Şekil 9 (d) pim çevresindeki toplam deformasyon değeri ~0.013 mm, Şekil 9 (e) pim çevresindeki zamana bağlı eşdeğer gerilme değeri 180.25 MPa ve Şekil 9 (f) çevre koşulları analizinde güvenlik faktörü ~1.5 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 9(a): Mevcut oküler gövdenin pim çevresindeki toplam deformasyon değeri. (b): Mevcut oküler gövdenin zamana bağlı eşdeğer gerilme dağılımı. (c): Mevcut oküler gövdenin çevre koşullarında güvenlik faktörü. (d): Yeni tasarım oküler gövdenin pim çevresindeki toplam deformasyon değeri. (e): Yeni tasarım oküler gövdenin zamana bağlı eşdeğer gerilme dağılımı. (f): Yeni tasarım oküler gövdenin çevre koşullarında güvenlik faktörü.

Figure 9(a): Total deformation value of the existing ocular body around the pin. (b): Time-dependent equivalent stress distribution of the existing ocular body. (c): Safety factor of the existing ocular body under environmental conditions. (d): Total deformation value of the new design ocular body around the pin. (e): Time-dependent equivalent stress distribution of the new design ocular body. (f): Safety factor of the new design ocular body under environmental conditions.

Mevcut ve yeni oküler gövdeye ANSYS-Workbench programında yapılan analizlerin sonuçları Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Oküler gövdelerin analiz sonuçları.

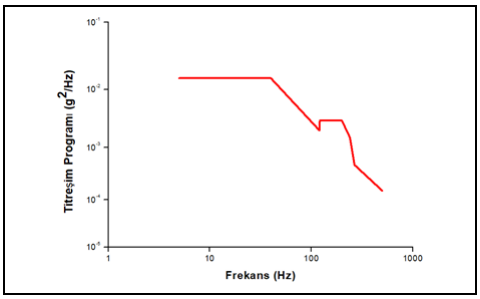
Table 5. Analysis results of ocular bodies.

	Toplam deformasyon değeri (mm)	Eşdeğer gerilme değeri (MPa)	Güvenlik Faktörü
Mevcut	0.011	473.77	1.1
Yeni	0.013	180.25	1.5
Fark	%18 (↑)	%62 (↓)	%36 (↑)

3.3.2 Rastgele titreşim analizi

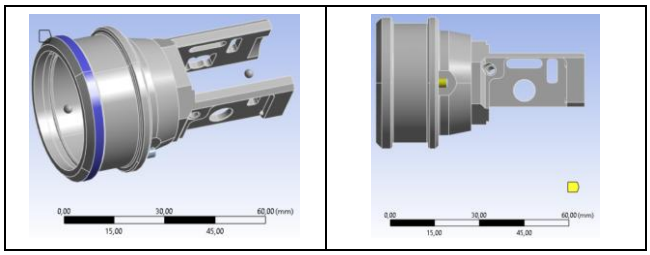
Savunma sanayi alanında çalışan firmaların test düzeneklerinde uygulamış olduğu MIL-STD-810H'ye (ABD Savunma Bakanlığı Test Yönetim Standardı) göre gündüz nişangâhının nakliyesi sırasında oküler gövdenin maruz kaldığı titreşimlerin etkilerini incelemek için Tablo 6'da verilen metot 514.8-prosedür I'e göre kamyon ile güvenli kargo yöntemi seçilmiştir [28].

Taşıma esnasında oküler gövdenin yönü bilinmediği için ANSYS programında Şekil 10 (MIL-STD-810H–Şekil 514.8C-3 Kategori 4) ve Tablo 7'de (MIL-STD-810H-Şekil 514.8C-II Kategori 4) verilen frekansa bağlı ASD (g^2/Hz) eğrisinin değerleri oküler gövdeye uygulanmıştır [28]. Şekil 11'de titreşim analizi için sabitleme bölgesi verilmiştir.



Şekil 10. Bilinmeyen yön için ortak taşıyıcı (ABD otoyol kamyonu titreşimine maruz kalma).

Figure 10. Common carrier for unknown direction (exposure to US highway truck vibration).



(a) (b)

Şekil 11. Titreşim analizi için mesnet yerleri. (a): Conta ile sabitleme yüzeyi. (b): Pimden yataklama.

Figure 11. Support locations for vibration analysis. (a): Fixing surface with gasket. (b): Bearing from pin.

Tablo 6. Titreşim ortamı kategorileri.

Table 6. Vibration environment categories.

Ömür Aşaması	Platform	Kategori	Malzeme Açıklaması
İmalat / Bakım	Fabrika tesisi / Bakım tesisi	1. İmalat/Bakım süreçleri 2. Nakliye/taşıma 3. Çevresel stres taraması	Malzeme / Montaj / Parça
Taşıma	Kamyon ve römorklar	4. Güvenli kargo	Güvenli kargo olarak malzeme
		5. Gelişigüzel kargo	Gelişigüzel kargo olarak malzeme
		6. Büyük montaj taşımacılığı	Büyük montaj grupları, sığınaklar, van ve römorklar
	Uçak	7. Jet 8. Pervane 9. Helikopter	Kargo olarak malzeme
	Deniz taşıtları	10. Deniz araçları	
	Demiryolu	11. Tren	
Operasyonel	Uçak	12. Jet 13. Pervane 14. Helikopter	Kurulu malzeme
	Uçak gereçleri	15. Jet	Depoda monte edilmiş
		16. Jet	Depoda kurulmuş
		17. Pervane 18. Helikopter	Depoda kurulmuş
	Füzeler	19. Taktik füzeler	Füzeler monte edilmiş (Serbest uçuş)
	Arazi	20. Arazi araçları	Tekerlekli/palaetli/vanlara monte edilmiş malzeme
	Deniz taşıtları	21. Deniz araçları	Kurulu malzeme
	Motorlar	22. Türbin motorları	Motorlara monte edilmiş malzeme
	Personel	23. Personel	Personelce taşınan malzeme
Tamamlayıcı	Tüm	24. En küçük bütünlük	İzolatörlerle kurulmuş/ömür döngüsü tamamlanmış
	Tüm araçlar	25. Dış konsollu	Antenler, kanat profilleri, kuleler vb.

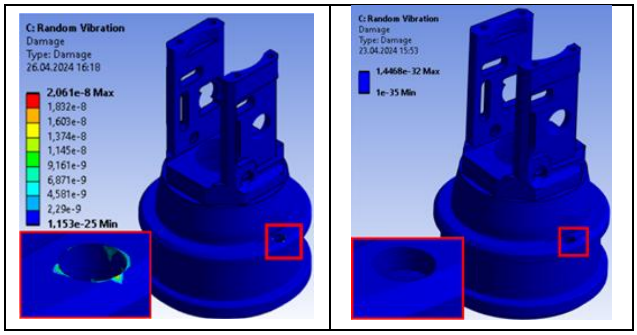
Tablo 7. Bilinmeyen yön için ortak taşıyıcı (Şekil 10'da verilen eğriler için kırılma noktaları).

Table 7. Common carrier for unknown direction (breaking points for the curves given in Figure 10).

Sınır Değerleri	
Frekans (Hz)	Otomatik spektral yoğunluk
5	0.015
40	0.015
120	0.002025
121	0.003
200	0.003
240	0.0015
266	0.000475
500	0.00015

rms = 1.17g

MIL-STD-810H standardında (Metot 514.8 Ek-C) belirtildiği gibi oküler gövde 60 dakika boyunca titreşime maruz bırakılmıştır [28]. Yapılan titreşim analizi sonucunda pim deliği ve çevresine gelen hasar oranı değerlerinin 1' den küçük olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 12(a)'da verilen mevcut oküler gövdenin pim çevresindeki toplam hasar oranı değeri ~2.061×10^{-8} olarak ölçülmüştür.



(a) (b)

Şekil 12(a): Mevcut oküler gövdenin hasar analizi. (b): Yeni tasarım oküler gövdenin hasar analizi.

Figure 12(a): Damage analysis of the existing ocular body. (b): Damage analysis of the new design ocular body.

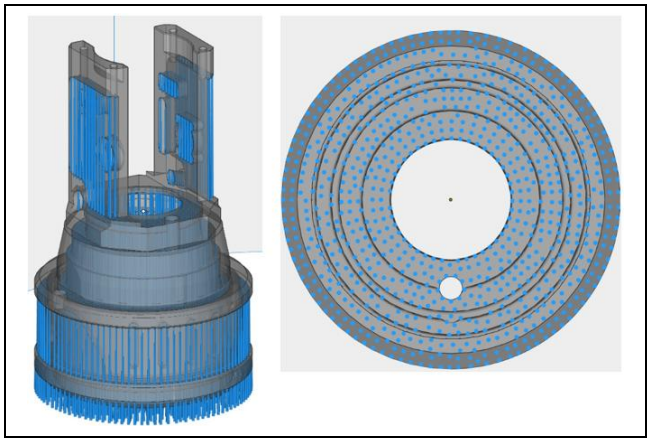
Şekil 12'de verilen hasar analizlerine göre pim çevresindeki toplam hasar oranı değerleri; mevcut oküler gövdede ~2.061×10^{-8} iken, yeni tasarım oküler gövdede ~1.447×10^{-32} olarak ölçülmüştür.

Yapılan titreşim analizi sonucunda gözlemlenen pim çevresindeki toplam hasar oranı değerinin yeni tasarımda, mevcut tasarıma göre azalmış olması, yeni tasarımda pim çevresinin titreşime daha dayanıklı olduğunu göstermektedir.

4 Yeni oküler gövdenin eklemeli imalatı

4.1 Parçanın tasarımı ve eklemeli imalatı

Şekil 13'te verilen yeni oküler gövde SolidWorks 2023 SP4 programında tasarımı tamamlandıktan sonra Metarialise Magic 25.02 programında baskı ayarları (eklemeli imalat platformunda konumlandırılması, destek yapıları ve katman kalınlığı vs.) yapılmıştır.

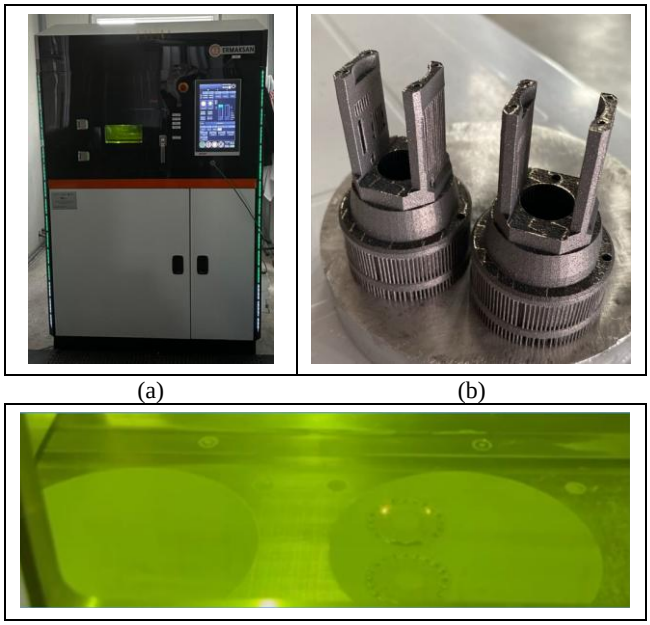


Şekil 13. Yeni oküler gövdenin destek yapıları.

Figure 13. Support structures of the new ocular body.

Eİ platformunda imalatı yapılacak oküler gövdenin ölçü hassasiyetinin yüksek olması hedeflendiğinden Şekil 13'te görüldüğü üzere parçanın dikey ile $45^0 \leq$ açıya sahip yüzeylerinin tamamına destek yapı eklenmiştir.

Şekil 14'te verilen yeni oküler gövdenin imalatı, Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi İleri Alaşımlar Üretim Merkezi bünyesinde yer alan ERMAKSAN Enavision 130 model lazer toz yatak füzyonu sisteminde AlSi10Mg alaşım tozu (≤53 µm) kullanılarak, 2433 katman olarak 20 saatte (ilk 1 saat ortamın şartlanması) gerçekleştirilmiştir.



(a) (b)

(c)

Şekil 14. Yeni tasarım oküler gövdelerin lazer toz yatağında imalatı. (a): Lazer toz yatak füzyonu sistemi. (b): İmal edilmiş yeni tasarım oküler gövdeler. (c): İmalat platformu detayı.

Figure 14. Laser powder bed fabrication of new design ocular bodies. (a): Laser powder bed fusion system. (b): Fabricated new design ocular bodies. (c): Detail of the manufacturing platform.

Yeni oküler gövdenin, lazer toz yatak füzyonu sisteminde imalatı için kullanılan parametreler Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. İşlem parametreleri.

Table 8. Process parameters.

Lazer gücü (W)	Lazer hızı (mm/s)	Lazer çapı (µm)	Tarama mesafesi (µm)	Tarama stratejisi	Katman kalınlığı (µm)
320	800	85	110	Chess	30

4.2 İmalat sonrası parçaya uygulanan ikincil işlemler

Parça, spiral kesici aracılığıyla eklemeli imalat platformundan ayrılmıştır. Ayırma işleminden sonra yüksek sıcaklık kapasiteli kül fırınında atmosferik basınç altında 2 sa. süre ile 300 °C'de gerilim giderme tavlaması uygulanmıştır. Isıl işlem sonrası parçanın yüzeyinin temizlenmesi için kumlama işlemi yapılmıştır (Şekil 15).

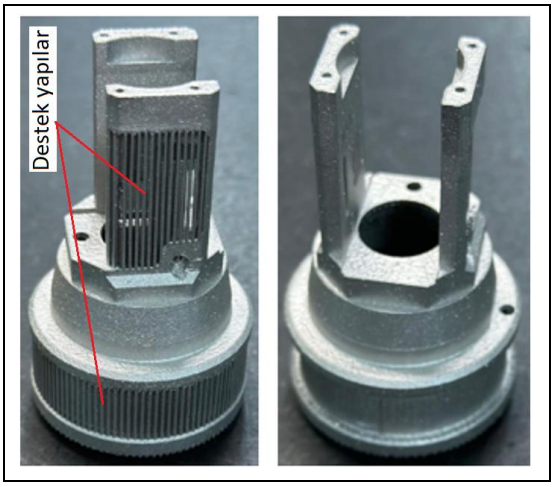


(a) (b)

Şekil 15(a): Kül fırını. (b): Tezgâh üstü kumlama makinesi.

Figure 15(a): Muffle furnace. (b): Bench top shot blasting machine.

Parçanın gerilim giderme tavlaması ve kumlama işlemi bittikten sonra destek yapıları, mini dişli ince kargaburun el aleti ile parçadan uzaklaştırılmıştır (Şekil 16).

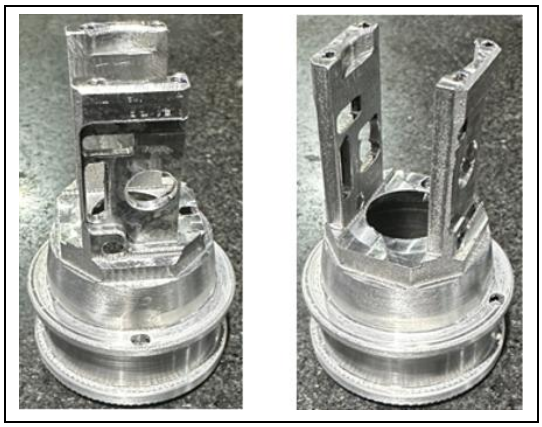


(a) (b)

Şekil 16(a): LPBF ile yapılan imalatta yeni oküler gövde üzerinde oluşan destek yapılar. (b): Yeni oküler gövdenin destek yapılardan temizlenmiş hali.

Figure 16(a): Support structures formed on the new ocular body in the manufacturing with LPBF. (b): The new ocular body cleaned of support structures.

Eİ ile imal edilen oküler gövdenin yüzey pürüzlülüğünün giderilmesi, el ile temizlenen destek yapılarından kalan pürüzlerin parçadan tamamen temizlenmesi ve nihai geometrinin elde edilmesi için parça CNC torna ve freze makinelerinde işlenmiştir (Şekil 17).



Şekil 17. Yeni oküler gövdenin destek yapıları söküldükten sonra torna ve freze ile talaşlı işlenerek nihai boyuta getirilmiş hali.

Figure 17. The new ocular body was machined to its final size using a lathe and milling machine after the support structures were removed.

5 Sonuçlar

Çalışmanın amacı, savunma sanayiinde kullanılan ve talaşlı imalat yöntemleri ile imal edilen A940 tüfek gündüz nişangâhının ağırlığını azaltmaktır. Bu amaçla gündüz nişangâhı iç bileşeni olan oküler gövdenin tasarımı değiştirilmiş ve eklemeli imalat yöntemlerinden LBPF ile imal edilmiştir. Al7075-T6 olan ilk malzemesi yerine, kaynak edilebilir özelliği sayesinde eklemeli imalata uygun AlSi10Mg kullanılmıştır. Tasarım ve malzeme değişikliklerinin ardından hem önceki hem de yeni tasarım oküler gövdenin ANSYS – Workbench programında analizleri yapılmış ve parçanın yeni malzeme ile eklemeli imalatı gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak;

- Yeni (AlSi10Mg malzeme kullanılan ve tasarımı değiştirilen) oküler gövde, ağırlık azaltmaya yönelik yapılan çalışma sonucunda mevcut oküler gövdeye göre ~%16 daha hafiftir,
- Yeni oküler gövdeye yapılan zamana bağlı sıcaklık analizi sonucunda, pim çevresindeki toplam deformasyon değeri (0.013 mm) mevcut oküler gövdeye (0.011) kıyasla ~%18 artmış, eşdeğer gerilme değeri (mevcut: 473.77 MPa, yeni tasarım: 180.25 MPa) malzemelerin akma dayanımlarındaki farktan dolayı ~%62 oranında azalmıştır,
- Hem mevcut oküler gövdenin hem de yeni oküler gövdenin, eşdeğer gerilme değerleri yüksek olsa da güvenlik kat sayılarının >1' in üstünde olmasından dolayı nihai akma sınırını aşmadığı gözlemlenmiştir,
- Titreşim altında hasar analizi sonuçları incelendiğinde, yeni oküler gövdenin hasar oranının (1.447×10^{-32}), mevcut oküler gövdeninkine (2.061×10^{-8}) kıyasla çok daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

6 Conclusions

The aim of the study is to reduce the weight of the A940 rifle day sight used in the defense industry and manufactured by machining methods. For this purpose, the design of the ocular body, which is the internal component of the day sight, was changed and manufactured with LBPF, one of the additive manufacturing methods. Instead of the original Al7075-T6 material, AlSi10Mg, which is suitable for additive manufacturing due to its weldable properties, was used. After

the design and material changes, both the previous and the new design ocular body were analyzed in ANSYS - Workbench program and additive manufacturing of the part was carried out with the new material. As a result;

- The new (AlSi10Mg material and redesigned) ocular body is ~16% lighter than the existing ocular body as a result of weight reduction efforts,
- As a result of the time-dependent temperature analysis of the new ocular body, the total deformation value around the pin (0.013 mm) increased by ~18% compared to the existing ocular body (0.011), while the equivalent stress value (existing: 473.77 MPa, new design: 180.25 MPa) decreased by ~62% due to the difference in the yield strength of the materials,
- It was observed that both the existing ocular body and the new ocular body did not exceed the ultimate yield limit, even though the equivalent stress values were high, because the safety factor was >1,
- When the results of the damage analysis under vibration are analyzed, it is observed that the damage rate of the new ocular body (1.447×10^{-32}) is much lower than that of the existing ocular body (2.061×10^{-8}).

7 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Cem Ertek, fikrin oluşması, yeni tasarımın değerlendirilmesi, yazım denetimi ve içeriğin kontrol edilmesi, makalenin yazılması ve sonuçların irdelenmesi hususunda; Ramazan Evrensel, literatür taraması, yeni tasarımın çizimi, sayısal analizlerin yapılması ve sonuçların elde edilmesi hususunda katkıda bulunmuştur.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur". "Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır".

9 Kaynaklar

[1] Aktürk M. Eklemeli İmalat Yöntemi ile Üretilmiş Alsi10Mg Malzemesinin Malzeme Yapısal Parametrelerinin Belirlenmesi ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Doğrulanması. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 2021.

[2] Aktürk M, Korkmaz EM. "Eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş alüminyum alaşımlarının malzeme yapısal parametrelerinin belirlenmesi üzerine bir derleme". *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 2(1), 49-60, 2021.

[3] Sürmen HK. "Eklemeli imalat (3b Baskı): Teknolojiler ve uygulamalar". *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi,* 24(2), 373-392, 2019.

[4] Rometsch PA, Zhu Y, Wu X, Huang A. "Review of high-strength aluminium alloys for additive manufacturing by laser powder bed fusion". *Materials& Design*, 219, 110779, 2022.

[5] Vanzetti M, Pavel MJ, Williamson CJ, Padovano E, Pérez-Andrade, LI, Weaver M, Brewer NL, Bondioli F, Fino P. "Design and characterization of ınnovative gas-atomized Al-Si-Cu-Mg alloys for additive manufacturing". *Metals*, 13(11), 1845, 2023.

[6] Aboulkhair NT, Simonelli M, Parry L, Ashcrofth I, Tuck C, Hague R. "3D printing of aluminium alloys: additive manufacturing of aluminium alloys using selective laser melting". *Progress in Materials Science*, 106, 100578, 2019.

[7] Tütük İ, Ural MM, Yılmaz MS, & Özer G. "Development of an alternative heat treatment to the traditional T6 heat treatment of AlSi10Mg alloy produced by additive manufacturing". *Journal of Materials Engineering and Performance*, 34(4), 3112-3122, 2025.

[8] Jiang Z, Sun J, Berto F, Wang X, Qian G. "Fatigue and fracture behavior of AlSi10Mg manufactured by selective laser melting: a review". *Physical Mesomechanics*, 26(4), 367-390, 2023.

[9] Peres LS, Gargarella P, Paiva MV, Rodrigues ADG, Adamiak M, Batalha GF. "Influence of moisture on the properties of AlSi10Mg powder for laser powder bed fusion". *Materials Research*, 27, e20230490, 2024.

[10] Kim I, Park SC, Kim YI, Kim DK, Lee KA, Oh SJ, Lee B. "Surface residual stress analysis of additive manufactured AlSi10Mg alloys". *Journal of Alloys and Compounds*, 945, 169315, 2023.

[11] Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, Nguyen KTQ, Hui D. "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges". *Composites Part B: Engineering*, 143, 172–196, 2018.

[12] Craftcloud. Dughi P. "3D Printing Aluminum-the Ultimate Guide". https://all3dp.com/1/3d-printing-aluminum/ (19.05.2024).

[13] Choe J, Kim KT, HunYu J, Park JM, Yang DY, Jung SH, Jo S, Joo H, Kan M, Ahn SY, Jeong SG, Kim ES, Lee H, Kim HS. "A novel route for predicting the cracking of inoculant-added AA7075 processed via laser powder bed fusion". *Additive Manufacturing*, 62, 103370, 2023.

[14] Yamada R, Ishizawa S, Itoh G, Kurumada A, Nakai M. "Effects of environment on fatigue crack growth behavior of 2000 and 7000 series aluminum alloys". *Recent Advances in Structural Integrity Analysis-Proceedings of the International Congress*, Sydney, Australia, 9-12 December 2014.

[15] Gatto A, Cappelletti C, Defanti S, Fabbri F. "The corrosion behaviour of additively manufactured AlSi10Mg parts compared to traditional al alloys". *Metals*, 13(5), 913, 2023.

[16] Tiwari A, Singh G, Jayaganthan R. "Improved corrosion resistance behaviour of AlSi10Mg alloy due to selective laser melting". *Coatings*, 13(2), 225, 2023.

[17] Spignoli N, Minak G. "Influence on fatigue strength of post-process treatments on thin-walled AlSi10Mg structures made by additive manufacturing". *Metals*, 3(1), 126, 2023.

[18] Šutka J, Medvecká D, Koňar R, Bruna M, Matejka M. "Evaluation of selected technological parameters for selective laser melting of AlSi10Mg metal powder". *Manufacturing Technology*, 23(1), 110-117, 2023.

[19] Pirinu A, Primo T, Del Prete A, Panella FW, De Pascalis F. "Mechanical behaviour of AlSi10Mg lattice structures manufactured by the Selective Laser Melting (SLM)". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 124(5), 1651-1680, 2023.

[20] Bosio F, Shen H, Liu Y, Lombardi M, Rometsch P, Wu X, Zhu Y, Huang A. "Production strategy for manufacturing large-scale AlSi10Mg components by laser powder bed fusion". *Jom*, 73(3), 770-780, 2021.

[21] Gite RE, Wakchaure VD. "A review on process parameters, microstructure and mechanical properties of additively manufactured AlSi10Mg alloy". *Materials Today: Proceedings*, 72(3), 966-986, 2023.

[22] Lupi G, Minerva G, Patriarca L, Casati R, Beretta S. "Fracture toughness of AlSi10Mg alloy produced by LPBF: effects of orientation and heat treatment". *International Journal of Fracture*, 247(3), 329-344, 2024.

[23] Paolino DS, Tridello A, Fiocchi J, Biffi CA, Chiandussi G, Rossetto M, Tuissi A. "VHCF Response up to 109 Cycles of SLM AlSi10Mg specimens built in a vertical direction". *Applied Sciences*, 9(15), 2954, 2019.

[24] Delva. "Aluminium AlSi10Mg for 3D Printing". https://delva.fi/en/aluminum/ (21.05.2024).

[25] Özsoy AL, Şirin E, Yıldırım ÇV, Sarıkaya M. "AlSi10Mg alaşımının SLM yöntemiyle üretilmesinde proses parametrelerinin yüzey kalitesi üzerindeki etkisi". *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 12(2), 480-493, 2024.

[26] Additive 3D Printing. "Features of 3D Printed AlSi10Mg Aluminium". https://additive-3d.com/aluminium-AlSi10Mg-3d-printing.html (21.05.2024).

[27] ASELSAN Hassas Optik A.Ş. "A940 1x-4x Gündüz Nişangâhı". https://aho.com.tr/tr/urunler/gunduz-gorus/a940-1x-4x-gunduz-nisangahi (09.01.2024).

[28] Trenton Systems. "Vibration Test Method MIL-STD-810 Method 514.8 Vibration". https://www.trentonsystems.com/hubfs/vibration_test_method_milstd810h.pdf (10.01.2024).

Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 31(7), 1143-1149, 2025

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Investigation of microstructures, mechanical properties, wear behavior and machinability of EN-GJS-500-7 (GGG50) grade ductile cast irons having modified chemical composition

Geliştirilmiş kimyasal bileşime sahip EN-GJS-500-7 (GGG50) kalite küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapısının, mekanik özelliklerinin aşınma davranışının ve işlenebilirliğinin incelenmesi

Mehmet Yıldırım[1*], *Hüseyin Gümüş*[2], *Mehmet Emin Özcan*[2]

[1]Department of Metallurgical and Materials Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Konya Technical University, Konya, Türkiye.
myildirim@ktun.edu.tr

[2]Mesa Machinery, Konya Industrial Zone, Konya, Türkiye.
huseyin.gumus4242@gmail.com, emin.ozcan@mesamakina.com.tr

Received/Geliş Tarihi: 12.12.2024 Revision/Düzeltme Tarihi: 13.04.2025 doi: 10.5505/pajes.2025.79958
Accepted/Kabul Tarihi: 22.05.2025 Research Article/Araştırma Makalesi

Abstract

Ductile cast irons (DI) are promising candidates for forged steels due to their lower density (10-15 %), lower production cost and good specific strength. The mechanical properties of DIs are heavily influenced by matrix (ferrite, pearlite, or ferrite+pearlite), type and concentration of alloying elements (Si, Cu, Sn, Cr and Ni. etc). The pearlite phase, which is stronger and harder than ferrite phase, depends not only on the chemical composition but also the cooling rate of sections having various section thickness. In this situation non-uniform microstructure and mechanical properties occur between the thick and thin sections of the parts. In this manner solid solution strengthened (with Si) ferritic DIs become prominent with more uniform microstructure and mechanical properties. In the present study, the microstructural properties, mechanical properties (tensile properties, hardness, and impact energy), wear resistance and tool life (turning machining operations) of EN-GJS-500-7 grade ductile cast irons, having modified composition (increased amount of Si, decreased amount of C and pearlite former), are studied in detail. The resultant microstructures and mechanical properties are compared with those for having traditional composition. For modified composition, the ferrite (solid solution strengthened with excess Si) amount considerably increases, and so the cast part exhibits uniform hardness distribution among the surface layer and center regions). In addition, the yield strength and the ultimate tensile strength (UTS) of the modified composition is slightly lower than those for traditional composition. In addition, modified composition exhibits better wear resistance (lower wear loss and friction coefficient) and longer tool life compared to those for traditional composition. As a result, an alloy with improved mechanical properties and good machinability has begun to be applied industrially.

Keywords: Ductile cast iron, Chemical composition, Microstructure, Mechanical properties, Wear behavior.

Öz

Küresel grafitli dökme demirler (KGDD), düşük yoğunlukları (%10-15), düşük üretim maliyetleri ve iyi özgül mukavemetleri nedeniyle dövme çelikler için aday malzemeler olarak düşünülmektedir. KGDD'lerin mekanik özellikleri matris tipine (ferrit, perlit veya ferrit + perlit), alaşım elementlerinin türü ve konsantrasyonuna (Si, Cu, Sn, Cr ve Ni. vb.) bağlıdır. Ferrit fazına göre daha güçlü ve daha sert olan perlit fazı sadece kimyasal bileşime değil aynı zamanda farklı kesit kalınlığına sahip parçalarda soğuma hızına da bağlıdır. Bu durum parçaların kalın ve ince bölümleri arasında farklı mikroyapıların oluşmasına ve farklı mekanik özelliklerin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bu durumda katı çözeltiyle güçlendirilmiş (Si) ferritik KGDD'ler daha homojen mikroyapı ve mekanik özelliklere sahip olarak öne çıkmaktadır. geliştirilmiş bileşime sahip (arttırılmış Si miktarı, azaltılmış C miktarı ve perlit oluşturucu) EN-GJS-500-7 kalite KGDD'lerin mikroyapısal ve mekanik özellikleri (çekme özellikleri, sertlik ve darbe enerjisi), aşınma direnci ve takım ömrü (tornalama sırasında) detaylı biçimde incelenmiştir. Elde edilen mikroyapılar ve mekanik özellikler, geleneksel bileşime sahip KGDD'lerin mikroyapı ve mekanik özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Geliştirilmiş bileşim için, ferrit (fazla Si ile güçlendirilmiş katı çözelti) miktarı önemli ölçüde artmakta ve bunun sonucunda döküm parçanın yüzey bölgeleri ile merkez (çekirdek) arasında düzgün bir sertlik dağılımı elde edilmiştir Ek olarak, geliştirilmiş bileşimin akma ve çekme mukavemeti , geleneksel bileşime göre çok az daha düşüktür. Buna ilaveten, geleneksel bileşime kıyasla geliştirilmiş bileşimin daha üstün aşınma direncine (daha düşük aşınma kaybı ve sürtünme katsayısı) sahip olduğu ve talaşlı imalat süreçlerinde uzun takım ömrünü uzattığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, geliştirilmiş mekanik özelliklere ve iyi işlenebilirliğe sahip bir alaşım endüstriyel olarak uygulanmaya başlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Küresel grafitli dökme demir, Kimyasal bileşim, Mikroyapı, Mekanik özellikler, Aşınma davranışı.

1 Introduction

Ductile iron (DI) is a well-known ferrous alloy composed of mainly Fe, C and Si [1]. DIs have a very wide application field such as crankshafts, heavy-duty engine parts, railway brake systems, pistons, wind-turbine parts, pumps, valves due to their good mechanical properties, high castability, good machinability, moderate fatigue, and wear resistance [1]-[9]. Compared to steels, DIs have lower production cost and lower densities (10%) [2]. Therefore, the quality, lower weight and lower cost make DIs suitable candidates for steels. The lower specific weight of DIs enables the casting of thinner-sectioned parts with good mechanical properties [4]. On the other hand, DIs can exhibit the best combination of mechanical properties

*Corresponding author/Yazışılan Yazar

(strength, ductility, and fracture toughness) among other cast irons (gray and white cast iron) [10],[11].

The matrix of the DIs can be ferritic, pearlitic, or a combination of ferritic and pearlitic. The type of the matrix is responsible for the variations in mechanical properties [3],[12]. The chemical composition of the DIs strongly affects the microstructure which further controls the resultant mechanical properties [13]. Moreover, the chemical composition may be responsible for the formation of casting defects such as exploded graphite, chunky graphite, dross, graphite flotation, nodule alignment, shrinkage, and gas porosity [14]-[17]. The DIs are designated as EN-GJS (European Standard for ductile cast iron) grades [18]. EN-GJS-500-7 is a traditional grade with ferritic/ pearlitic matrix containing 3.85-3.95 % C and 2.30-2.40 % Si. In addition, Cu or Sn is added as pearlite forming elements. The Cu_{eq} of EN-GJS-500-7 grade is in the range of 0.35-0.45 % [19]. EN-GJS-500-7 castings having various section thicknesses may result in strongly various pearlite concentrations which further lead to important differences in hardness values throughout the casting. The amount of pearlite phase is influenced not only by the chemical composition but also by the cooling behavior. The thick sections of the casting contain relatively lower amounts of pearlite due to slower cooling rate and as a result relatively softer. On the other hand, the thin sections of the casting contain relatively higher amounts of pearlite due to faster cooling rate and exhibit higher hardness values. The important differences between the hardness values have some disadvantages:

i. Difficulty in achieving similar hardness tolerances, and
ii. Poor machinability [18].

Researchers have been making efforts to develop a ductile cast iron that exhibits the best combination of mechanical properties and improved machinability. In this sense, solid solution strengthening of ferrite phase with high amount of Si seems to be the most effective way to obtain uniform mechanical properties throughout the casting [20]-[28]. Recently, a previous work [29] stated a new DI grade of EN-GJS-500-14. Compared to conventional EN–GJS–500-7 grade, this new grade is a solid solution strengthened ferritic DI. The new composition possesses higher tensile strength, higher elongation and better machinability than conventional grade. These outstanding features of the new grade can be ascribed to the relatively high Si concentration. Furthermore, it is also reported that this new grade can be a candidate for steel. Thus, this study aims to investigate the microstructural properties, mechanical properties (yield strength, ultimate tensile strength, ductility, impact toughness and hardness), wear behavior and machinability of EN-GJS-500-7 (GGG50) grade ductile irons having modified chemical composition. In this manner, two different ductile irons are cast. One of them has the traditional EN-GJS-500-7 (GGG50) chemical composition and the other one has modified composition with decreased C and Cu_{eq} (pearlite former) and increased Si amount. In addition, this study mainly emphasizes the comparison of microstructural and mechanical properties of ductile irons having traditional and modified compositions.

Kandemir et al. [30] investigated the wear behavior of various DIs having various pearlite and ferrite amounts with respect to section size and chemical composition. They showed that the alloy showing minimum wear loss did not exhibit the highest strength. Emre Aydın [31] investigated the mechanical properties, wear performance, machinability and corrosion resistance of EN-GJS-500-7 grade DIs having various ferrite and pearlite amounts. Like Kandemir et al. [30], Emre Aydın [31] also stated that the composition having the highest pearlite exhibited the best mechanical properties, but the lowest wear loss was not observed. Moreover, he also showed that the composition having highest amount of ferrite encountered lowest cutting forces during machining. On the other hand, Björkegren and Hamberg [32] compared the tool lives of traditional EN-GJS-500-7 and relatively high Si (3.27 %) containing DIs. They showed that under cutting speed of 240 m/min the tool lives of traditional and high Si containing DIs until flange wear were determined as 12 and 17 minutes (nearly 1.5 times longer), respectively. They also presented that surface roughness is lower for high Si containing DI.

Recently, there was an increasing tendency to develop DIs by exhibiting the best combination of mechanical properties, physical properties, machinability, and wear resistance [29]. Therefore, we have tried to design and develop a modified composition, which can be considered as the originality of the present study. The modified chemical composition of the EN-GJS-500-7 DI is developed by our research team.

The chemical composition of the modified composition is determined considering the castability, solidification defects and resultant mechanical properties. The DIs having good castability, sufficient mechanical properties, reduced shrinkage and non-formation of other solidification/casting defects should have a carbon equivalent (CE) close to the eutectic composition of 4.3%. High CE (>4.3%) have several artefacts: (i) if the composition has an excess C content, primary graphite can form and results in a harmful influence on mechanical properties due to the graphite flotation as a casting defect on the upper regions of parts, (ii) if the composition has an excess Si content, the brittle to ductile transition temperature increases, ferrite phase becomes brittle (rapid drop of elongation) and exploded graphite forms as a result of lower solidification rate. In the modified composition, firstly, it is aimed to decrease the amount of pearlite to obtain a uniform distribution of hardness between thick and thin sections (or surface and center of specimens). Thus, the amount of pearlite forming elements Cu and Sn is reduced. Secondly, the hardness lose due to the decrease in the amount of pearlite can be compensated by solid solution strengthening of softer ferrite phase by increasing Si content. Hence, the amount of Si is increased. However, Si content is not much increased since the detrimental effects of high amount of Si. Thirdly, the C content is decreased to ensure CE to be close to 4.3.

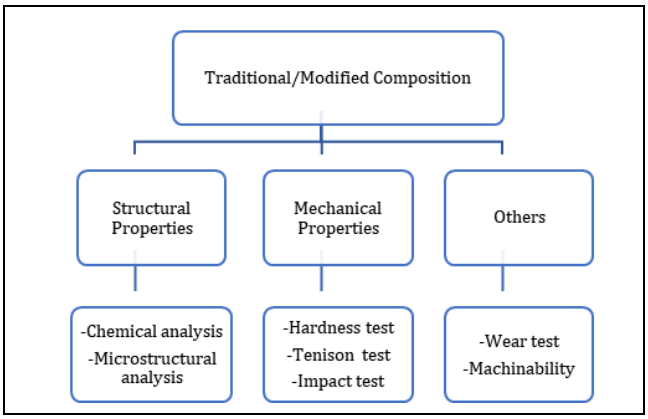
2 Experimental procedures

2.1 Production of the specimens

The GGG-50 (EN-GJS-500-7) ductile cast iron is produced utilizing a medium frequency induction furnace with a 1500 kg capacity at Mesa Machinery (Konya, Turkey). The charge is composed of pig iron, foundry return scraps (runners, risers, etc.) and steel scraps. The spheroidization is done with FeSiMg7 utilizing the tundish ladle method. Then, the melt is inoculated with FeSi75 alloy (containing 2-3% Ba). Finally, the molten material is poured into sand molds shaped like standard keel blocks.

2.2 Characterization

Scheme 1 lists all analyses and tests applied to the traditional and modified EN-GJS-500-7 compositions.



Scheme 1. The flowchart showing the study plan.

The chemical compositions (traditional and modified) of the specimens (Table 1) are analyzed utilizing an Oxford Foundry Master model optical emission spectrometer (OES). The microstructural investigation of the samples is performed utilizing a Nikon Eclipse MA 100 model inverter type optical microscope. Prior to the microstructural examination, the specimens are prepared using standard metallographic sample preparation techniques. Firstly, disc shape specimens (40 mm diameter and 10 mm height) are cut using an abrasive cutter. Then The specimens are mechanically ground using SiC emery papers (ranging from 180 to 1200 grit), polished with a 1 µm alumina suspension, and finally etched with a 3% Nital solution. In addition, the fundamental microstructural parameters of cast irons such as nodularity, nodule count graphite amount and ferrite/pearlite ratio are determined using image analyzer software.

Brinell hardness measurements are conducted utilizing a Bulut Machinery BMS 3000-OB model Brinell hardness tester under a load of 3 tons on polished surfaces. The load is applied for 8 seconds. The tensile tests of the specimens (Figure 1) are conducted utilizing an ALSA KTM 600 Model (60 tons/600 kN) hydraulic universal tensile testing apparatus with a deformation rate of 8 mm/min. The tensile tests are performed according to the TS EN 1563 (tension test of metallic materials at room temperature) standard. The yield strength, ultimate tensile strength (UTS) and percent elongation values are determined with tension tests. Charpy impact tests are performed at room temperature using an ALSA ZBC 300 model impact tester in accordance with ASTM E23-18 (Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials) standard. The cast specimens are cut and machined to produce standard rectangular un-notched specimens with dimensions of 10 × 10 × 55 mm.

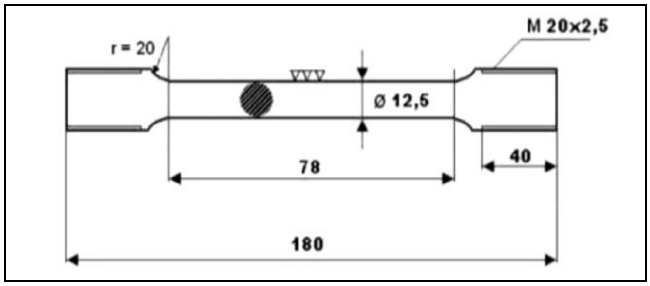


Figure 1. The geometry and dimensions of standard tensile test specimens used in the tensile tests.

Prior to abrasive wear tests, disc-shaped samples with a diameter of 30 mm and a thickness of 10 mm are prepared by cutting them with an electric saw. The samples are then ground and polished. The abrasive wear tests are performed using a UTS Tribolog tribometer with the reciprocating ball-on-disc method, in accordance with ASTM G133 (Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear). Moreover, the wear tests are performed in dry sliding conditions at ambient temperature and with a relative humidity of 68 %. A WC ball, having 6 mm diameter, is used during the tests. The test parameters are listed in Table 2.

The friction force and friction coefficient between the abrasive ball and the specimen are measured during the abrasive wear tests. The frictional force is measured with a load cell, and the coefficient of friction is obtained by dividing this force by the normal load. The 2D wear profile (depth and width) of the wear tracks is examined by a Nanomap LS stylus profilometer [33]. The wear loss is calculated as the volume of wear track. After the tests, the worn surfaces of the samples are investigated by light optical microscopy.

The effect of different compositions on machinability is investigated by calculating the tool life. Two different specimens (specimen1: 66 mm diameter and 125 mm length, specimen2: 48 mm diameter and 125 mm length) of each composition are considered in turning operations. DNMG150608-PM4 carbide inserts are used in the experiments. Table 3 provides the cutting speed, feed rate, and depth of cut for the specimens. During machinability tests, the total number of specimens were recorded until the cutting tool fails.

Table 1. The chemical analysis (wt.%) of EN-GJS-500-7 grade ductile irons having traditional and modified compositions.

Composition	Fe	C	Si	Mn	P	S	Mg	Sn	Cr	Cu	Mo	Ni
Traditional	bal.	3.95	2.32	0.152	0.034	0.04	0.059	0.035	0.023	0.066	0.003	0.001
Modified	bal.	3.45	2.80	0.127	0.038	0.012	0.061	0.023	0.020	0.029	0.011	0.001

Table 2. The test parameters of the abrasive wear test.

Force	20 N
Sliding distance	100 m
Frequency	5 Hz
Stroke length	10 mm
Sliding speed	100 mm/s

Table 3. Cutting parameters used in the machinability tests.

Specimen 1	Cutting Speed (rpm)	Feed rate (mm/min)	Depth of cut (mm)
Specimen 1 (ϕ66, L125)	850	0.16	5
Specimen 1 (ϕ48, L125)	1000	0.25	3

3 Results and discussion

The chemical compositions (wt.%) of the traditional and modified EN-GJS-500-7 nodular cast irons are displayed in Table 1. Compared to the traditional composition, % C is reduced and % Si is increased somewhat. In addition, Sn, which is used as a pearlite former, also decreased in the modified composition. The carbon equivalents (CE) for studied compositions are calculated by the equation given below.

$$CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3} \quad (1)$$

The calculated CE values for the traditional and modified EN-GJS-500-7 nodular cast irons are 4.435 and 4.396, respectively. To obtain a nearly constant CE value, the increase in Si content is compensated for the decrease in C content.

The optical micrographs of surface regions (Figure 2) clearly indicate the microstructural differences between traditional and modified compositions. For modified composition Figure 2(b), the amount of ferrite (white regions) is evidently greater than that of traditional composition Figure 2(a).

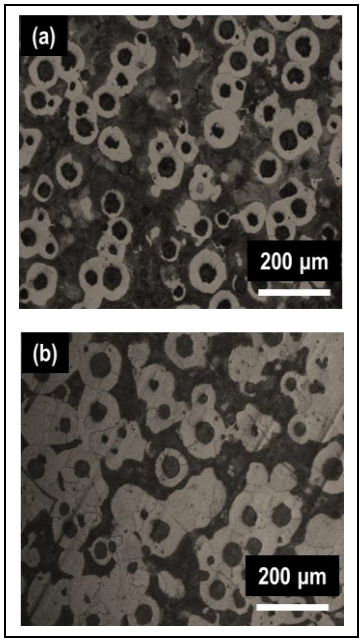


Figure 2. The optical micrographs of the near surface layers of (a): Traditional, and (b): Modified compositions.

For the center part of the casting (Figure 3), the amount of ferrite (white regions) and pearlite (dark non-spherical regions) seem to be similar. Moreover, the difference between the determined ferrite/pearlite ratio of modified and traditional compositions (Table 1) is more pronounced in the surface regions. Thus, it can be concluded that the optical micrographs and determined microstructural features via microscopy software are consistent with each other.

The optical micrographs of studied cast irons are shown in Figures 2-4. The microstructures of both compositions are composed of graphite (black spheres), ferrite (light regions) and pearlite (dark regions) phases. Neither carbide formation nor any casting defects (i.e., chunky graphite, exploded (degenerated) graphite, spiky graphite, shrinkage, graphite flotation and dross) are observed in the microstructures of studied alloys.

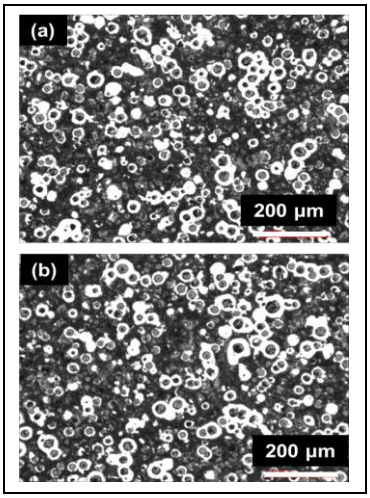


Figure 3. The optical micrographs of the central parts of (a): Traditional, and (b): Modified compositions.

The important microstructural features (Figure 4 and Table 4) such as nodularity, nodule count, and ferrite/pearlite ratio are also determined via microscopy software. Ten independent micrographs are considered for each composition (traditional or modified) and each location (surface or center).

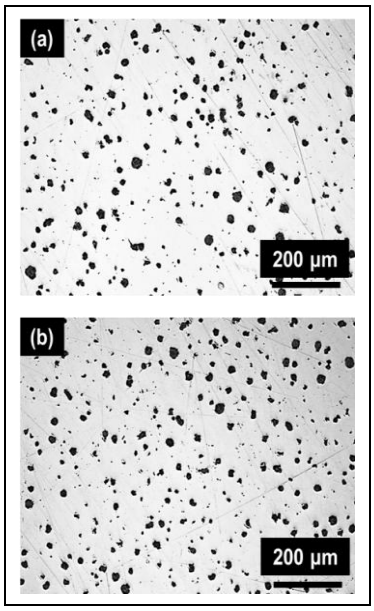


Figure 4. The optical micrographs showing the distribution of spheroidal graphite for (a): traditional, and (b): modified compositions.

Table 4. The microstructural features of traditional and modified EN-GJS-500-7 compositions determined with microscopy software.

Parameter	Traditional	Modified
Nodularity (%)	73 ± 1	74 ± 1
Nodule Count (1/mm²)	257.1 ± 7.2	273.4 ± 8.1
Ferrite/pearlite ratio surface	0.35 ± 0.01	0.85 ± 0.02
Ferrite/pearlite ratio center	0.47 ± 0.01	0.90 ± 0.02

The Brinell hardness profile of the studied compositions are shown in Figure 5. The overall hardness value of traditional composition is considerably higher than that of modified one.

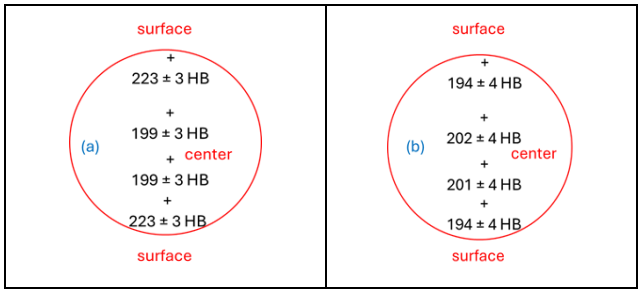


Figure 5. The hardness profile of the (a): Traditional, and (b): Modified compositions.

For traditional composition, the center of the specimen is softer compared to the specimen surface. As the specimen surfaces of the cast parts are prone to pearlite formation due to the higher cooling rates, the specimen surface is expected to exhibit higher hardness values. On the other hand, for the modified composition, the situation is vice versa. In this case, the center of the sample is harder than the sample surface and the hardness variation between the surface and center is less pronounced. The results of Brinell hardness measurements confirm the microstructural differences of traditional and modified EN-GJS-500-7 ductile iron compositions. For modified composition, increased ferrite concentration and uniform distribution of ferrite phase among the parts result in a uniform distribution of hardness values. Although the ferrite/pearlite ratio is lower in surface compared to the center for modified composition, the center region is somewhat harder than surface layer. This contradiction can be explained with the chemical analysis of modified composition. The main differences between the chemical compositions of traditional and modified DIs are increased C, reduced Sn as a pearlite former and increased Si. For modified composition, the decrease in Sn and increase in Si lead to a strong decrease in pearlite ratio and solid solution strengthening of softer ferrite phase. It is well-known that Si acts as a strong solid solution strengthener for ferrite phase [20],[21],[34]. Therefore, the hardness of the center region is somewhat higher than surface despite its lower pearlite ratio.

The results of tension and Charpy impact tests for traditional and modified EN-GJS-500-7 compositions are listed in Table 5. The standard data for EN-GJS-500-7 composition present in EN 1563 standard [19] is also presented for comparison. According to these results, both traditional and modified compositions exhibit better tensile properties (higher yield strength, UTS and percent elongation) than that of standard data. The modified composition exhibits slightly lower strength values and very similar elongation values compared to those for traditional composition. The resultant tensile properties agree well with the obtained hardness values. Additionally, the impact energy for modified composition is also somewhat greater. However, the impact energies of both traditional and modified compositions are considerably lower than the value present in the EN 1563 standard. This situation can be explained with the higher yield and strength values compared to the values present in the standard. For DIs, impact energy values are inversely proportional to strength/hardness values. For example, the softest EN-GJS-400-18 grade exhibits the highest impact energy of 120 J, while the hardest grade EN-GJS-800-2 grade exhibits the lowest impact energy of 15 J.

Table 5. Tensile properties and impact energies of traditional and modified EN-GJS-500-7 compositions. (The standard data is given for comparison).

Mechanical Property	Traditional	Modified	EN 1563 Standard
Yield Strength (MPa)	477 ± 12	461 ± 11	Min. 320
Ultimate Tensile Strength (MPa)	735 ± 18	665 ± 19	Min. 500
% elongation	10.8 ± 0.6	10.9 ± 0.6	Min. 7
Impact Energy (J)	51.2 ± 3.4	57.3 ± 3.8	Min. 70

The mechanical tests reveal that EN-GJS-500-7 ductile iron can exhibit a good combination of mechanical properties with modified composition. Satisfactory yield and tensile strength, high elongation and uniform hardness values would provide better machinability and uniform mechanical properties among the layers having various section thicknesses. The wear profiles along with optical micrographs of worn surfaces of traditional and modified EN-GJS-500-7 DIs are illustrated in Figures 6 and 7.

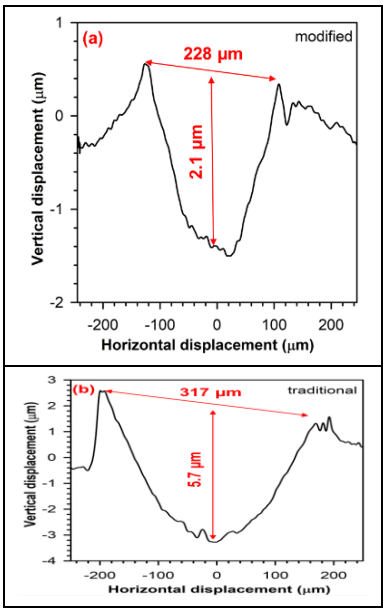


Figure 6. Wear profiles along the vertical direction of wear tracks. (a): Modified, and (b): Traditional compositions.

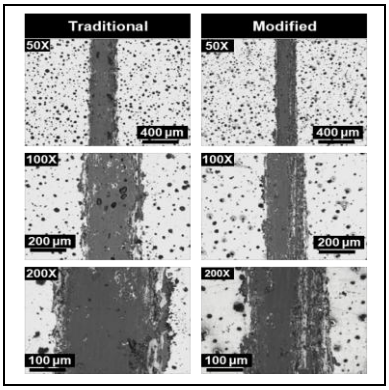


Figure 7. The optical micrographs of worn surfaces after abrasive wear test.

In addition, the volume loss of both specimens is determined from the wear profiles and listed in Table 6. The wear profiles reveal that modified composition, traditional composition shows wider (317 μm) and deeper (5.7 μm) wear profile. Moreover, the average coefficient of friction value (Table 6) is also higher for traditional composition than that of modified composition. The results of the wear tests clearly indicate that the wear resistance of modified composition is considerably higher than that of traditional composition. The results of the wear tests imply that tensile properties significantly affect wear resistance. Due to the higher tensile and yield strength of the modified specimens, they exhibit greater wear resistance and lower volume loss. Specifically, the volume loss in the traditional specimen is 3.7 times higher than that of the modified specimen.

Table 6. The coefficient of friction and wear loss values of traditional and modified EN-GJS-500-7 ductile cast irons.

Composition	Coefficient of friction	Wear loss (mm^3)
Traditional	0.21	0.0181
Modified	0.15	0.0049

Additionally, the tool life (Table 7) is investigated during the machining (turning process) of the traditional and modified specimens. For the modified composition, the tool life is importantly higher for both investigated specimen geometries. The tool lives are nearly 1.3 times higher in the machining of modified specimens rather than traditional composition. Moreover, the tool life of specimen 2 (48 mm diameter and 125 mm length) is longer than that of specimen 1 (66 mm diameter and 125 mm length). It is believed that the smaller radius of specimen 2 directly influences the tool life.

Table 7. The tool life of traditional and modified EN-GJS-500-7 ductile cast irons during the turning process.

Composition	Tool life (number of machined specimens)	
	Specimen 1 (ϕ66, L125)	Specimen 2 (ϕ48, L125)
Traditional	113	197.3
Modified	143.5	257.3

Björkegren and Hamberg [32] studied the hardness distribution and machinability of DIs having high Si contents (3.27 and 3.72 %) than traditional compositions and compared the results with those for traditional compositions. They showed that there was no uniform hardness distribution between the sections having different thickness for traditional composition. In addition, the matrix phase of traditional composition was composed of pearlite and ferrite. For compositions containing high Si contents, the matrix phase was ferrite, and the hardness was nearly same throughout the part. They also stated that the tool lives of high Si containing DI is nearly 1.5 times higher than tool live of traditional composition. They reported that harder pearlite-softer ferrite matrix phase led to interrupted cuts for traditional composition. For compositions containing high Si contents, no interrupted cuts were observed since the matrix phase was composed of only ferrite phase. Furthermore, Dawson and Hollinger [35] presented that increasing pearlite concentration improved milling tool life, while it reduced the tool life in turning operations.

4 Conclusion

The microstructural properties and mechanical properties of EN-GJS-500-7 (GGG50) grade DIs having modified chemical compositions are studied in detail, and following conclusions can be drawn:

- EN-GJS-500-7 (GGG50) grade DIs having modified composition are successfully produced without any important casting defects,
- The ferrite amount of modified composition is significantly higher because of the high amount of Si and low amount of pearlite former,
- For modified composition, the microstructures are nearly uniform among the surface and the center regions,
- For modified composition, uniform hardness distribution is observed,
- The tensile properties of both modified and traditional compositions are better than those for present in the standard,
- For modified composition, the yield strength and the ultimate tensile strength is slightly lower than those for traditional composition, while impact energy is a bit higher,
- The ductility of both compositions is similar,
- Modified composition exhibits better wear resistance (less wear loss and lower friction coefficient) compared to traditional composition,
- For the modified composition, the tool life is also strongly longer than traditional composition.

5 Author contribution statements

Mehmet Yıldırım, Conceptualization, Investigation, Experiments Hüseyin Gümüş: Writing-original draft, Writing–Review & editing, Mehmet Emin Özcan, The development of the idea

6 Ethics committee approval and conflict of interest statement

“All authors declare that the present paper is prepared in accordance with ethical standards”.

“The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships”.

7 References

[1] Pribulová A, Futaš P, Pokusova M. “Influence of charge composition on EN-GJS-500-7 ductile iron properties in foundry operating conditions”. *Materials Science Forum,* 998, 42-47, 2020.

[2] Veljačić Z, Grilec K. “Increasing the wear resistance of marine diesel engines elements made of ductile iron”. *NAŠE MORE: International Journal of Maritime Science and Technıology,* 68(3), 150-156, 2021.

[3] Pacha-Gołębiowska H, Piekarska W. “Mechanical properties of ductile cast iron relation to the charge elements”. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* 1199(1), 012022, 2021.

[4] Gouveia RM, Silva FJ, Paiva OC, Andrade MDF, Pereira LA, Moselli PC, Papis KJ. “Comparing the structure and mechanical properties of welds on ductile cast iron (700 MPa) under different heat treatment conditions”. *Metals*, 8(1), 72, 2018.

[5] Jeshvaghani RA, Shamanian M, Jaberzadeh M. "Enhancement of wear resistance of ductile iron surface alloyed by stellite 6". *Materials & Design*, 32(4), 2028-2033, 2011.
[6] Iacoviello F, Di Cocco V. "Influence of the graphite elements morphology on the fatigue crack propagation mechanisms in a ferritic ductile cast iron". *Engineering Fracture Mechanics*, 167, 248-258, 2016.
[7] Sübütay H, Şimşir M, Aydın M, Karaca B. "Effect of chill formation on the mechanical properties and microstructure of grey and nodular cast irons used in automotive industry". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(1), 1-7, 2016.
[8] Aşkun Y, Hasirci H, Şeker U. "Evaluation of machinability of ductile irons alloyed with Ni and Cu in terms of cutting forces and surface quality". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(2), 1-7, 2003.
[9] Dundar S. "Application of austempered ductile iron to rail wheel sets". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(3), 283-287, 2003.
[10] Hütter G, Zybell L, Kuna M. "Micromechanisms of fracture in nodular cast iron: From experimental findings towards modeling strategies–A review". *Engineering Fracture Mechanics*, 144, 118-141, 2015.
[11] Kolukisa S. "The effect of the welding temperature on the weldability in diffusion welding of martensitic (AISI 420) stainless steel with ductile (spheroidal graphite-nodular) cast iron". *Journal of Materials Processing Technology*, 186(1-3), 33-36, 2007.
[12] Stawarz M. "Comprehensive quality assessment of ductile iron". *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability,* 2(22), 55-58, 2004.
[13] Rojek J, Hyrcza-Michalska M, Bokota A, Piekarska W. "Determination of mechanical properties of the weld zone in tailor-welded blanks". *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 12, 156-162, 2012.
[14] Collini L, Pirondi A, Bianchi R, Cova M, Milella PP. "Influence of casting defects on fatigue crack initiation and fatigue limit of ductile cast iron". *Procedia Engineering*, 10, 2898-2903, 2011.
[15] Ferro P, Lazzarin P, Berto F. "Fatigue properties of ductile cast iron containing chunky graphite". *Materials Science and Engineering: A*, 554, 122-128, 2012.
[16] Collini L, Pirondi A. "Fatigue crack growth analysis in porous ductile cast iron microstructure". *International Journal of Fatigue*, 62, 258-265, 2014.
[17] Iacoviello F, Di Cocco V. "Degenerated graphite nodules influence on fatigue crack paths in a ferritic ductile cast iron" *Frattura ed Integrità Strutturale*, 34, 416-414, 2014.
[18] Stets W, Löblich H, Gassner G, Schumacher P. "Solution strengthened ferritic ductile cast iron properties, production and application". *International Journal of Metalcasting*, 8, 35-40, 2014.
[19] DIN Deutsches Institut für Normung. "Founding-Spheroidal Graphite Cast Irons". Berlin, Germany, DIN EN 1563 Standard, 2012.
[20] de La Torre U, Loizaga A, Lacaze J, Sertucha J. "As cast high silicon ductile irons with optimized mechanical properties and remarkable fatigue properties". *Materials Science and Technology*, 30(12), 1425-1431, 2014.
[21] Yürektürk Y, Baydoğan M. "Effect of aluminizing and austempering processes on structural, mechanical and wear properties of a SSF ductile iron". *Materials Research Express*, 6(1), 016550, 2018.
[22] Borsato T, Ferro P, Berto F, Carollo C. "Effect of solidification time on microstructural, mechanical and fatigue properties of solution strengthened ferritic ductile iron". *Metals*, 9(1), 24, 2018.
[23] Hartung C, Logan R, Plowman A, Wilkinson D, Hoel EG, Ott E. "Research on solution strengthened ferritic ductile iron (SSFDI) structure and properties using different treatment and inoculation materials". *International Journal of Metalcasting*, 14(4), 1195-1209, 2020.
[24] Weiß P, Brachmann J, Bührig-Polaczek A, Fischer SF. "Influence of nickel and cobalt on microstructure of silicon solution strengthened ductile iron". *Materials Science and Technology*, 31(12), 1479-1485, 2015.
[25] Erturk SÖ, Ozel A. "Investigation on the production of solution strengthened ductile iron part grade 500-14". *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1), 41-45, 2020.
[26] Weiß P, Riebisch M, Bührig-Polaczek A. "Mechanical properties and impact toughness of nickel and aluminum alloyed high silicon ductile iron". *Materials Science Forum*, 925, 304-310, 2018.
[27] Riebisch M, Sönke HG, Pustal B, Bührig-Polaczek A. "Influence of carbide-promoting elements on the pearlite content and the tensile properties of high silicon SSDI ductile iron". *International Journal of Metalcasting*, 12, 106-112, 2018.
[28] Keleş A, Cengiz R, Yildirim M. "Effect of alloying elements and technological parameters of austempering on the structure and mechanical properties of ductile cast iron (ADI)". *Metal Science and Heat Treatment*, 65, 191–199, 2023.
[29] Menk W. "A new high strength high ductile nodular iron". *Materials Science Forum,* 925, 235-230, 2018.
[30] Kandemir AS, Gecu R. "Influence of vanadium content and cooling rate on the characteristics of vanadium-alloyed spheroidal graphite cast irons". *Journal of Alloys and Compounds*, 934, 168017, 2023.
[31] Aydın E. Mechanical, Machinability, High Temperature Wear, Corrosion and Tribocorrosion Behavior of Alloyed EN-GJS-500-7 Quality Spheroidal Graphite Ductile Iron. PhD Thesis, Bilecik Şeyh Edebali University, Bilecik, Turkey, 2023.
[32] Bjsrkegren LE, Hamberg K. "Ductile iron with better machinability compared to conventional grades". *Foundryman*, 91, 386-391, 1998.
[33] Afseoren M, Ersoz TT, Yildirim M. "Comparison of warm and cold forging with friction welding for inner constant velocity joints (CVJs)". *Transactions of the Indian Institute of Metals,* 77(11), 3341-3352, 2024.
[34] Yürektürk Y. Effect of Austempering and Aluminizing Processes on Properties of High Silicon Spheroidal Graphite Ductile Irons. PhD Thesis, İstanbul Technical University, İstanbul, Türkiye, 2023.
[35] Dawson S, Hollinger I. "The effect of metallurgical variables on the machinability of compacted graphite iron". *Sintercast,* 2014, 1-23, 2014.

Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 31(7), 1150-1163, 2025

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Optimization of the design parameters of pressurized compound cylinders for equivalent stress and total cost

Basınçlı bileşik silindirlerde tasarim parametrelerinin eşdeğer gerilme ve toplam maliyet açisindan optimizasyonu

Mevlüt Aydın[1*], *Abdullah Çakan*[1], *Mevlüt Türköz*[1]

[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Konya Technical University, Konya, Türkiye.
maydin@ktun.edu.tr, acakan@ktun.edu.tr, mturkoz@ktun.edu.tr

Received/Geliş Tarihi: 18.02.2025 Revision/Düzeltme Tarihi: 17.05.2025 doi: 10.5505/pajes.2025.88107
Accepted/Kabul Tarihi: 22.05.2025 Research Article/Araştırma Makalesi

Abstract

The optimal design of compound cylinders is crucial due to their high-pressure load-bearing requirements and significant manufacturing costs. This study focuses on optimizing the design parameters of compound cylinders to achieve minimal equivalent stress and production costs. To this end, a weighted multi-objective Grey Wolf Optimization (GWO) algorithm was employed. Furthermore, the influence of design parameters on shrinkage pressure and the equivalent stresses of the inner and outer cylinders was analyzed using detailed statistical methods. As a result of the multi-objective optimization, two reference designs were considered for comparison: one prioritizing minimum stress and the other minimizing manufacturing cost. Both the design parameter levels and weight ratios were systematically optimized. Using the optimal weight ratios and the GWO method, the maximum equivalent stress in the inner cylinder increased by 20%, while the total cost was reduced by a factor of 2.75. Consequently, a design with sufficient structural reliability was achieved, significantly lowering the manufacturing costs of compound cylinders.

Keywords: Compound cylinder, Design parameter, Grey wolf algorithm, Multi-Objective-Optimization, Total cost.

Öz

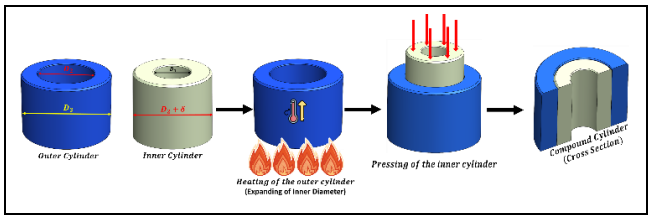
Bileşik silindirlerin tasarımı, yüksek basınç taşıma gereksinimleri ve önemli üretim maliyetleri nedeniyle büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma, bileşik silindirlerin tasarım parametrelerini, minimum eşdeğer gerilme ve üretim maliyeti elde edecek şekilde optimize etmeyi amaçlamaktadır. Bu doğrultuda, ağırlıklı çok amaçlı Bozkurt Optimizasyonu (BO) algoritması kullanılmıştır. Ayrıca, tasarım parametrelerinin arayüzey basıncı ve iç-dış silindirlerin eşdeğer gerilmeleri üzerindeki etkisi ayrıntılı istatistiksel yöntemlerle analiz edilmiştir. Çok amaçlı optimizasyon sonucunda, karşılaştırma amacıyla iki referans tasarım ele alınmıştır: biri minimum gerilmeye öncelik veren, diğeri ise üretim maliyetini en aza indiren tasarımdır. Hem tasarım parametre seviyeleri hem de ağırlık oranları sistematik olarak optimize edilmiştir. Optimum ağırlık oranları ve BO yöntemi kullanılarak, iç silindirdeki maksimum eşdeğer gerilme %20 artarken, toplam maliyet 2.75 kat azaltılmıştır. Böylece, yeterli yapısal güvenilirliğe sahip bir tasarım elde edilerek, bileşik silindirlerin üretim maliyeti önemli ölçüde düşürülmüştür.

Anahtar kelimeler: Bileşik silindir, Tasarım parametreleri, Bozkurt algoritması, Çok amaçlı optimizasyon, Toplam maliyet.

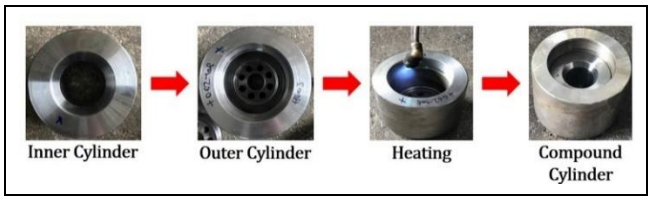
1 Introduction

Thick-walled cylinders (TWC) are defined as cylinders with a wall thickness of at least ten times the inside radius [1]. TWCs are one of the widely used metal structures in many engineering fields [2]. TWCs are used in the hydraulic, chemical, machinery manufacturing, petroleum, military, and nuclear power plant industries. There are many applications, such as high-pressure reactor vessels, rocket engines, process plants, air compressor units, hydraulic tanks, extrusion containers, barrels, and gas storage tanks [3]. TWCs generally work under high pressures, and both hoop and radial stresses occur in TWCs. These stresses are not evenly distributed throughout the wall thickness of the cylinder [4]. The resulting stresses are not only due to internal pressure on the cylinders. As a result of their shrink fit, a significant amount of tension occurs. The manufacturing method of the cylinder, finishing method, notch effect, and radii (closed-end cylinders) affect the stresses in TWCs and reduce their fatigue life. However, the dimensions of the cylinders are the most critical factor in the occurrence of these stresses. In engineering applications, compound cylinders are used instead of thickening the walls to reduce stresses in TWCs working under high pressures. Compound cylinders consist of two or more TWCs assembled by shrink-fitting them to each other. Shrink fit is a non-permanent assembly process performed without the use of any fasteners. The shrink-fit process is done as follows: the outer cylinder is heated and then expanded, and the inner cylinder is pressed into the hub of the outer cylinder. The primary purpose of the shrink-fit process is to both assemble and create a shrinkage pressure at the interface [4]. Shrinkage pressure generates compressive stresses on the outer surface of the inner cylinder. It has been proved analytically and numerically in many studies that this effect of the shrinkage pressure reduces the maximum equivalent stresses, especially when working under internal pressure. As a result of the stress state generated by the shrink fit, a metal structure that resists higher pressures is manufactured by using less material than the total material used in a single cylinder [5]. There are methods to reduce stress levels in order to increase the fatigue life of the cylinders. Using shrink-fitted compound cylinders is one of them. A schematic and real illustration of the shrink-fit process is shown in Figure 1.

*Corresponding author/Yazışılan Yazar



(a)

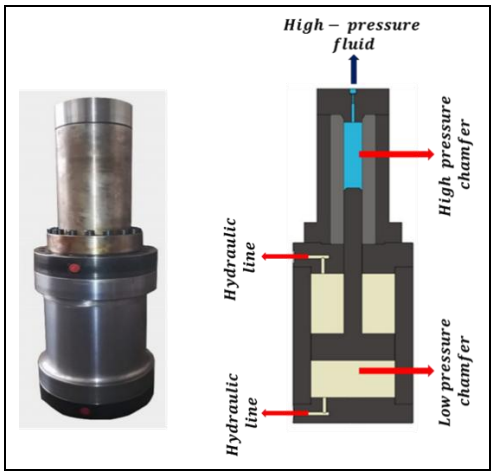


(b)

Figure 1. Illustration of the shrink-fit process. (a): Schematic, (b): Real.

Firstly, the shrinkage allowance (δ) is determined, and the cylinders are manufactured by adding this tolerance to the outer diameter of the inner cylinder. Then, the outer cylinder is heated and is waiting for expansion. Expansion varies according to the type of material and the maximum temperatures that can be reached. After expansion, the inner cylinder is centered into the outer cylinder and pressed to the hub. The cylinders are then allowed to cool. During cooling, the puckering of the outer cylinder is prevented by the inner cylinder, thus creating shrinkage pressure. The shrinkage pressure acts as an external pressure applied to the outer surface of the inner cylinder. High tensile stresses in the cylinders operating under high internal pressure may cause the part to fatigue after a while. In compound cylinders, the shrinkage pressure creates localized residual compressive stresses and increases the fatigue life [6]. Therefore, the calculation of the stresses in TWCs is very important for safe design and determination of the amount of material to be used. Radial and hoop stresses and shrinkage pressures of compound and unlayered TWCs under internal pressure were first analytically calculated by French engineer G. Lame in 1833 [7]. These stresses are used for simple geometry cylinders. Finite element methods (FEM) have been developed for more complex structures [5]. In the literature, there are many analytical and numerical calculations of the stress of compound cylinders and the changes in the fatigue life of the cylinders with the shrink fit process [3],[5],[6],[8].

One of the critical areas of use of compound cylinders is "pressure intensifiers," which sheds light on this study. Ultra-high pressures are used in industry for hydroforming, water jet cutting, sealing, blast resistance, and fatigue tests. In addition, ultra-high pressures are also used in autofrettage, industrial cleaning, and high-pressure pasteurization processes, which increase the pressure-bearing capacity of structures. Ultra-high pressures are achieved using pressure intensifiers. By using pressure intensifiers, ultra-high pressures of 200-600 MPa are obtained. In pressure intensifiers, as shown in Figure 2, the low-pressure chamber is a standard hydraulic cylinder and operates with standard hydraulic pressures such as 25 MPa. The pressure of the liquid-filled into the high-pressure chamber is increased by the area ratio [3]. At ultra-high pressures, damage in the cylinders can be dangerous and costly.



(a) (b)

Figure 2. Illustration of the pressure intensifier with 350 MPa working pressure [9]. (a): Real, (b): Schematic.

For this reason, TWCs, which are subjected to cyclic high stresses in pressure intensifiers, are generally manufactured in multiple layers and from materials with high yield and fatigue strength. In addition, it is also important to determine the dimensions that can be used safely in the design of hydraulic cylinders.

The pressure intensifier in Figure 2 operates as a single-acting hydraulic cylinder and can generate a maximum pressure of 350 MPa pressure. At such high pressures, high radial and hoop stresses occur in both the inner and outer cylinders of the high-pressure chamber. In the high-pressure chamber, pressure intensifiers operating under ultra-high pressures may cause fatigue damage. The hypothesis of this study was based on the fatigue damage and fracture of the pressure intensifier (shown above) while operating under a pressure of 350 MPa. The pressure intensifier that caused fatigue damage is shown in Figure 3.

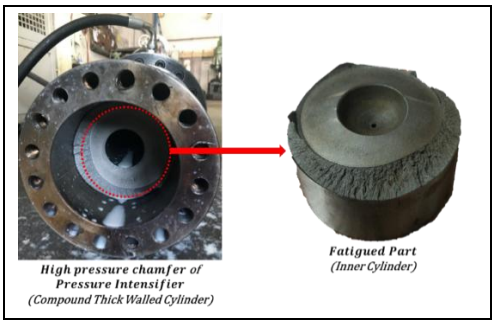


Figure 3. Fatigue damage in the Pressure intensifier [9].

In metal constructions operating under high pressures, the factor of safety should be kept high. Furthermore, the design should be analytically and numerically examined experimentally. In the industry, the wall thickness of the inner cylinder is generally increased to ensure the safety of such constructions. However, some studies in the literature show that thickening the inner cylinder is not the most critical change that can lead to stress reduction and decreased fatigue life [3]. The dimensions of the outer cylinder and the minimal shrinkage allowance are of high importance for the stresses in the cylinders.

Paredes et al. have studied shrink-fitted fasteners in an elastic region. They used the Lame formula to analyze the average contact stress in the hole walls and verified the analytical results by finite element analysis and experimental methods [10]. Benuzzi and Donzella examined the forces applied in the shrink-fitting of a railway axle and wheel with a complex structure using analytical and numerical studies [11]. It is concluded that SEA results are better than analytical results for complex components. Öztürk analytically and numerically evaluated the shrinkage pressure occurring at different interference tolerances of thick-walled compound cylinders with steel-steel and steel-aluminum materials [5]. The stresses that occurred in the shrink-fitting process were calculated by FEA along the wall and compared with analytical values. As a result of the comparisons, it was stated that FEMs successfully estimated the shrinkage pressures in the compound cylinders. In addition, it has been stated that FEAs are more reliable than analytical methods in determining the stresses of shrink-fitted parts with complex geometry. Özel et al. analyzed the stress and deformation for different hub-shaft connections by FEA to determine the shrinkage allowance [12]. The stresses on the outer surface of the inner cylinder were analytically calculated and verified by Lame equations. Similar to other studies in the literature, it is stated that Finite Element results are more valuable than analytical results in the calculations of shrink-fitted specimens with complex geometry. As a result of the studies, it was stated that the end regions of the cylinders are more unsafe, and higher stresses occur than in the center regions. Aydin et al. have investigated the effect of shrinkage pressure on the fatigue life of cylinders in shrink-fitted compound cylinders [6]. As a result of the FEAs, fatigue life increased as the shrinkage allowance increased. Under the same conditions, the life of the single-layer cylinder was 5586 cycles, while the life of the optimum compound cylinder increased by 99% to 9530 cycles. In the study by Aydın and Türköz, it was found by numerical analyses that the weight can be reduced by up to 36% compared to a single-layer structure in compound cylinder designs formed with different material pairs [13]. Aydin et al. calculated the maximum equivalent stresses occurring in the compound cylinders used in pressure intensifiers analytically and numerically [3]. They then conducted a validation study. They concluded that the most influential parameter in the inner cylinder at 350 MPa internal pressure is the shrinkage allowance. They also proved that the inner cylinder wall thickness does not contribute to the maximum stress and fatigue life of the material. Akay and Rıdvanoğulları researched the optimum turning process parameters for the shrink fit in the train wheel [14]. The surface roughness must be in the range of 0.8-3.2 micrometers in order for this shrink fit to be adequately performed. In order to achieve these levels, they optimized the cutting depth, feed, and cutting girl parameters. Campos and Hall have simplified Lame's equations [15]. Simplified formulas and classical Lame equations were compared with SEA results. The simplified equations were found to agree with both results. In addition, it has been found that the radial stress does not depend on the thickness in thin-walled shrink-fit processes. Wang et al. proposed a new theoretical model that predicts nonuniform stress distributions in shrink-fitted constructions [16]. Experiments and analytical analysis have validated the theoretical model. In the study, contact length and shrinkage ratio in the shrink fit process were also investigated as effect parameters. Stress distributions of different material pairs (Ni36CrTiAl - 50Ni-50Fe, AISI 1045 - AISI 1045) at full contact conditions were analyzed. As a result, the theoretical model has been shown to have high accuracy in estimating the stress distribution. It is stated that the same model can be used in different material pairs. Wang et al. stated that non-uniformly contacting regions will cause stress concentration, and this causes deviations in the results in Lame equations [17]. Wang et al. derived a stress formulation in a double-layer TWC operating under internal pressure [18]. They also used the bi-modulus of the material while deriving this formulation. Zhu et al. produced a composite elastoplastic solution for a double-layer or multi-layer cylinder using the ratio of tensile strength σ_t to compressive strength σ_c. In addition to the importance of estimating the stresses occurring in compound TWCs, it is also very important to make the optimum geometric design according to these stresses [19]. Designers must present ideas that reduce stresses while reducing material and manufacturing costs. This problem raises an optimization problem.

The originality of this study is to optimize the compound cylinder used in pressure intensifiers for total equivalent stress, total weight, and manufacturing cost using the grey wolf algorithm. The detailed statistical analysis and multi-objective weighted optimization for total equivalent stress and total cost of compound cylinders were performed for the first time in the literature. In this context, it is aimed at designing both lower cost and constructions with lower stresses at ultra-high pressures. The performance criteria in this study are, respectively, the interface pressure, the maximum stress occurring in the inner cylinder, the maximum stress occurring in the outer cylinder, and the total cost. The maximum stress values of the outer cylinder were constrained, and the parameters were optimized by determining the optimal weights of the total cost, as well as the maximum stress that occurred in the inner cylinder. After that, constrained and weighted optimization performed using the optimal weight ratios. The results of this study will shed light on the industrial organizations that design compound cylinders and academic studies on the subject.

2 Material and method

In this study, the compound high-pressure chambers of pressure intensifiers used to achieve ultra-high pressures such as 450 MPa will be optimized in terms of total equivalent stress and total cost. In this context, the effects of the inner radius of the inner cylinder (R_1) the thickness of the inner cylinder (T_1), the thickness of the outer cylinder (T_2), and the shrinkage allowance (δ) on the shrinkage pressure, the maximum equivalent stresses in the inner cylinder and the total cost (material and manufacturing) were investigated. The optimum parameter levels were obtained for two different scenarios. The parameters were given schematically in Figure 4. In Figure 4, the inner radius of the inner cylinder is indicated by R_1, outer radius of the inner cylinder by R_2, outer radius of the outer cylinder by R_3, the wall thickness of the inner cylinder by T_1, and the wall thickness of the outer cylinder by T_2. The outer radius of the inner cylinder (which is also the inner radius of the outer cylinder) is given by $R_1 + T_1$, while the outer radius of the entire assembly is $R_1 + T_1 + T_2$. The symbol δ represents the shrink fit allowance (interference) between the inner and outer cylinders.

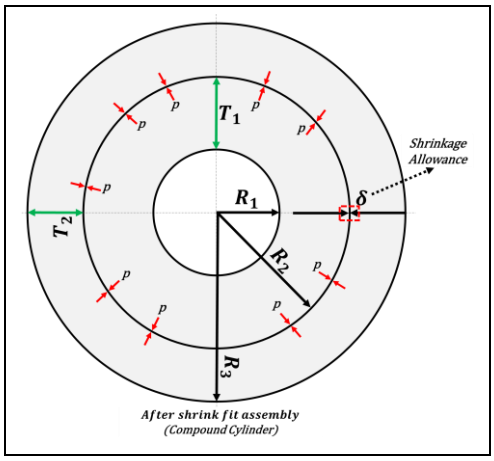


Figure 4. Schematic representation of shrink fit assembly and shrinkage allowance.

2.1 Shrinkage pressure and stress calculation in compound cylinder

High stresses occur in TWCs operating under ultra-high pressure. Properly dimensioned construction is crucial for operating under high stresses without damage. In compound TWCs, the shrinkage pressure generates a pre-stress in the compression direction on the inner cylinder surfaces. The compressive pre-stress in the inner cylinder reduces the tensile stress resulting from the internal pressure. In fact, the compressive stresses on the inner surface increase the fatigue strength of the structure by preventing the progression of micro-cracks. Therefore, compound cylinders can withstand much higher stresses than single-layer cylinders of equivalent thickness. The number of layers is decided according to the intensity of the internal pressure and the resulting stresses. The assembly of compound cylinders is done by press-fitting or heating. The most widely used assembly process is the heated fitting process. To assemble the cylinders, the outer cylinder is heated, and the inner cylinder is inserted into it. In the meantime, due to the size difference, the so-called "shrinkage pressure" (p) occurs at the interface [7]. Equation 1 shows the formula of the interface pressure resulting from the shrink fit of two cylinders [20]. In the formula, E represents the modulus of elasticity of the material.

The radial (σ_r) and hoop (σ_h) stresses occur in TWCs under internal and external pressures. The stresses in the inner and outer cylinders are shown schematically in Figure 5.

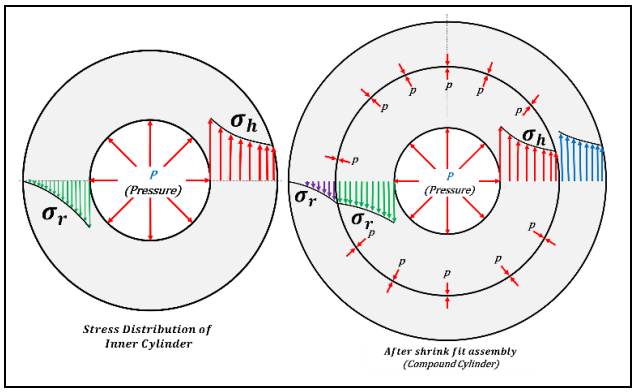


Figure 5. Stress distribution of inner and compound cylinders under inner and shrinkage pressure.

Lame equations (Equations 2 and 3) are used for the calculation of stresses [20]. In the equations, E is the modulus of elasticity, ν is the Poisson's ratio, r is a constant indicating at which radius "r" of the cylinder the stress is calculated, and C is the stress constant. C_1 and C_2 are constants that vary with internal and external pressure and are shown in Equations 4 and 5. In this equations p_i is the inner pressure, p_o is the outer pressure.

$$p = \frac{E * \delta}{R_2} * \frac{(R_2^2 - R_1^2) * (R_3^2 - R_2^2)}{2 * R_2^2 * (R_3^2 - R_1^2)} \quad (1)$$

$$\sigma_r = \frac{E}{1 - v^2} * \left[C_1 * (1 + v) - C_2 * \frac{1 - v}{r^2}\right] \quad (2)$$

$$\sigma_h = \frac{E}{1 - v^2} * \left[C_1 * (1 + v) + C_2 * \frac{1 - v}{r^2}\right] \quad (3)$$

$$C_1 = \frac{1 - v}{E} * \left[\frac{(R_1^2 * p_i) - (R_2^2 * p_o)}{(R_2^2 - R_1^2)}\right] \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{1 - v}{E} * \left[\frac{R_1^2 * R_2^2 * (p_i - p_o)}{(R_2^2 - R_1^2)}\right] \quad (5)$$

Radial and hoop stresses calculated (in equation 6 and 7) as when C and C_2 values are substituted in Equations 2 and 3;

$$\sigma_r = \left[\frac{(R_1^2 * p_i) - (b^2 * p_o)}{(R_2^2 - R_1^2)}\right] - \left[\frac{(p_i - p_o) * R_1^2 * b^2}{r^2 * (R_2^2 - R_1^2)}\right] \quad (6)$$

$$\sigma_h = \left[\frac{(R_1^2 * p_i) - (R_2^2 * p_o)}{(R_2^2 - R_1^2)}\right] + \left[\frac{(p_i - p_o) * R_1^2 * R_2^2}{r^2 * (R_2^2 - R_1^2)}\right] \quad (7)$$

To determine the maximum equivalent stress in the cylinder, the Von-Mises equivalent stress theory was used;

$$\sigma_{eq.} = \sqrt{\sigma_r^2 - \sigma_r * \sigma_h + \sigma_h^2} \quad (8)$$

2.2 Calculation of total cost in compound cylinders

Total cost is an important factor in the manufacture of compound cylinders in pressure intensifiers. This study aims to optimize the dimensions of cylinders operating at ultra-high pressures, which are planned to be manufactured at low stresses and low costs. Hence, material and machining costs were taken into account when calculating the total cost. Compound cylinders are generally manufactured by turning hollow cylinders. In order to normalize the material cost, the cylinder materials will be considered as solid cylinders. Firstly, the volumes of the inner and outer cylinders in each experiment were calculated, and then the weights were calculated by multiplying the density of the steels (7.8 g/cm^3). The liquid volume capacity of the pressure intensifier whose TWC was designed was determined as 0.3 liters. Therefore, the internal volume of the inner cylinder was 0.3 liters (300000 mm^3). Due to the different diameter of the inner cylinder, the lengths of all cylinders were calculated as shown in Equation 10 to fix the volume capacity.

$$V_{cylinder} = \pi * R_1^2 * l_{cylinder} \quad (9)$$

$$l_{cylinder} = \frac{300{,}000}{\pi * R_1^2} \quad (10)$$

The total material cost was then found by multiplying the market value of AISI 4340 (inner cylinder) and AISI 1050 (outer

cylinder). The total weight and total cost calculation are detailed in equations 11-15, respectively. In the equations, V represents the volume, l represents the cylinder length, and m represents the mass.

$$V_{inner} = \pi * R_2^2 * l\ [mm^3] \quad (11)$$

$$V_{outer} = \pi * R_3^2 * l\ [mm^3] \quad (12)$$

$$m_{inner} = V_{inner} * 7.8x10^{-6}\ (kg) \quad (13)$$

$$m_{outer} = V_{outer} * 7.8x10^{-6}\ (kg) \quad (14)$$

$$Total\ Cost_{material} = m_{inner}(kg) * 20\left(\frac{\$}{(kg)}\right) + m_{outer}(kg) * 12(\frac{\$}{(kg)}) \quad (15)$$

For the manufacturing cost of the cylinders, the machining cost presented in literature [21]-[23] is adapted in this study. In calculation, we assumed that the tool must be replaced when one operation is finished. The total cost for the compound cylinders was calculated by summation of $Total\ Cost_{material}$ and $Total\ Cost_{manufacturing}$. The total cost for manufacturing formulated as follows:

$$Total\ Cost_{manufacturing} = C_o * T_u + C_t * \frac{T_C}{T} \quad (16)$$

where C_o is the operating cost per minute ($3\$/min$), C_t is the cutting tool cost ($10\$/piece$), T_u is the total manufacturing time, T_c is the turning time, and T is the tool life. The operation cost C_o is the combination of labor and depreciation cost. The total manufacturing time, T_u, is defined as follows:

$$T_u = T_C + \frac{T_C}{T} * T_R + T_L + T_p \quad (17)$$

where T_R is the time of replacing the used cutting tool, T_L is the presetting time, and T_P is the time for changing the parts. Since the cutting insert is replaced after each operation, the $\frac{T_C}{T}$ ratio is assumed to be 1. The operation times are considered as follows: T_R is 2 minutes, T_L is 2 minutes, and T_P is 3.5 minutes. The cutting time T_C is calculated using the Equation 18.

$$T_C = \frac{\pi * D * l}{v * f} \quad (18)$$

where D is the diameter of the cylinder, l is the length of the cylinder, v is the cutting speed and f is the feed value in (mm/rev). After calculating the machining costs for the inner and outer cylinders as presented above, the total manufacturing cost was determined by adding them. The total cost of the compound cylinders was calculated by summing the total material cost (given in Equation 15) and the total turning cost.

2.3 Study's methodology

A parametric optimization was performed for three different scenarios using a weighted objective function. Firstly, a full factorial design with 81 experiments consisting of four parameters and three levels of each parameter was created. Then, detailed statistical analyses were performed for all performance criteria, followed by determining the constraint for optimization. These constraints include the maximum equivalent stress in the outer cylinder. After determining the coefficient of the constraints, optimization was performed using the grey wolf algorithm based on weighted objective functions. Finally, three different scenarios were compared with the optimum levels obtained for all performance criteria.

Parameter levels shown in Table 1 were used to investigate the effects of the geometrical parameters in the TWC. The full factorial design (shown in Table 2) was used in this study. Although wall thickness is given as the second and third parameters, the results are given according to the radii of the cylinders. Regression and variance analyses were applied to the results, and the significance and effect levels of the parameters on the results were expressed in detail.

Table 1. Parameters and levels of this study.

Parameters	Parameter levels		
	1	2	3
Inner radius of inner cylinder (R_1) (mm)	17.5	25	32.5
Inner cylinder wall thickness (T_1) (mm)	15	30	45
Outer cylinder wall thickness (T_2) (mm)	15	30	45
One-sided shrinkage allowance (δ) (mm)	0.03	0.06	0.09

2.4 Detailed statistical analysis of performance criteria

In this study, detailed statistical analyses are performed for the output parameters of shrinkage pressure, maximum equivalent stress in the inner cylinder, maximum equivalent stress in the outer cylinder, and total cost. Firstly, variance analysis (ANOVA) was applied to the output parameters.

Table 2. Full factorial experimental plan.

Exp.	R_1 (mm)	T_1 (mm)	T_2 (mm)	δ (mm)
1	17.5	15	15	0.03
2	17.5	15	15	0.06
3	17.5	15	15	0.09
4	17.5	15	30	0.03
5	17.5	15	30	0.06
6	17.5	15	30	0.09
7	17.5	15	45	0.03
8	17.5	15	45	0.06
9	17.5	15	45	0.09
10	17.5	30	15	0.03
11	17.5	30	15	0.06
12	17.5	30	15	0.09
13	17.5	30	30	0.03

Table 2. Continued.

Exp.	R_1 (mm)	T_1 (mm)	T_2 (mm)	δ (mm)
14	17.5	30	30	0.06
15	17.5	30	30	0.09
16	17.5	30	45	0.03
17	17.5	30	45	0.06
18	17.5	30	45	0.09
19	17.5	45	15	0.03
20	17.5	45	15	0.06
21	17.5	45	15	0.09
22	17.5	45	30	0.03
23	17.5	45	30	0.06
24	17.5	45	30	0.09
25	17.5	45	45	0.03
26	17.5	45	45	0.06
27	17.5	45	45	0.09
28	25.0	15	15	0.03
29	25.0	15	15	0.06
30	25.0	15	15	0.09
31	25.0	15	30	0.03
32	25.0	15	30	0.06
33	25.0	15	30	0.09
34	25.0	15	45	0.03
35	25.0	15	45	0.06
36	25.0	15	45	0.09
37	25.0	30	15	0.03
38	25.0	30	15	0.06
39	25.0	30	15	0.09
40	25.0	30	30	0.03
41	25.0	30	30	0.06
42	25.0	30	30	0.09
43	25.0	30	45	0.03
44	25.0	30	45	0.06
45	25.0	30	45	0.09
46	25.0	45	15	0.03
47	25.0	45	15	0.06
48	25.0	45	15	0.09
49	25.0	45	30	0.03
50	25.0	45	30	0.06
51	25.0	45	30	0.09
52	25.0	45	45	0.03
53	25.0	45	45	0.06
54	25.0	45	45	0.09
55	32.5	15	15	0.03
56	32.5	15	15	0.06
57	32.5	15	15	0.09
58	32.5	15	30	0.03
59	32.5	15	30	0.06
60	32.5	15	30	0.09
61	32.5	15	45	0.03
62	32.5	15	45	0.06
63	32.5	15	45	0.09
64	32.5	30	15	0.03
65	32.5	30	15	0.06
66	32.5	30	15	0.09
67	32.5	30	30	0.03
68	32.5	30	30	0.06
69	32.5	30	30	0.09
70	32.5	30	45	0.03
71	32.5	30	45	0.06
72	32.5	30	45	0.09
73	32.5	45	15	0.03
74	32.5	45	15	0.06
75	32.5	45	15	0.09
76	32.5	45	30	0.03
77	32.5	45	30	0.06
78	32.5	45	30	0.09
79	32.5	45	45	0.03
80	32.5	45	45	0.06
81	32.5	45	45	0.09

Minitab 21 was used to obtain the ANOVA table, and the P-value and contribution ratio of the parameters on the results were interpreted. Then, the plots for the main effects were obtained and interpreted for all performance criteria. After ANOVA, regression analyses were performed. Within the scope of regression analysis, regression curve, R-square value, and histogram graph were obtained. The regression analysis results obtained for all performance criteria are also comprehensively interpreted.

2.5 Constrained and weighted Grey Wolf algorithm optimization for total equivalent stress and total cost

Today, optimization processes are frequently used in design and various engineering problems. The main reasons for this are environmentally friendly design, energy efficiency, cost reduction, weight reduction, and making designs more useful. In this study, the optimum design parameters of shrink-fitted cylinders were determined. In the optimization process, the grey wolf algorithm introduced by Mirjalilil et al. was used [24]. Grey wolf optimization has been used in the literature for both single-objective and multi-objective optimization problems for many different engineering disciplines [25]-[28]. There are four different grey wolf groups to mimic the leadership hierarchy of grey wolves used for the implementation of the grey wolf algorithm. In the leadership hierarchy shown in Figure 6, the first layer is alpha (α), representing the most robust and most capable head wolf. In the second layer, the beta (β) wolves command the other lower-level wolves and communicate with the alpha wolves.

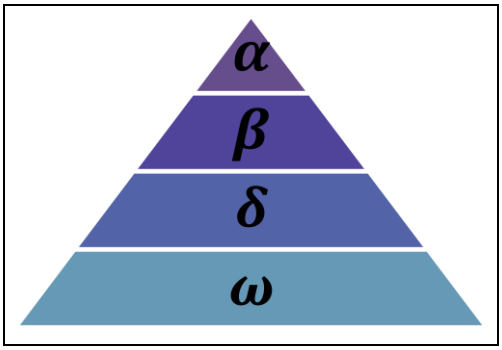


Figure 6. Hierarchy of grey wolf (dominance decreases from top down) [24].

In the optimization algorithm, they amplify the alpha's commands tra, transmit them to the lower-level wolves, and provide feedback to the alpha wolf. In the lowest layer are the omega wolves (ω), which occupy a large part of the total and are mainly responsible for stabilizing the internal relations of the population and protecting and monitoring the young wolf population. Wolves in the third stratum are categorized as delta wolves (δ), which do not belong to the other three strata and must submit to alpha and beta class wolves but dominate omega wolves [24]. MATLAB software was used to perform optimization.

Beyond their hierarchical structure, cooperative hunting is another key behavior modeled in the GWO algorithm. As outlined by Muro et al. (2011), the hunting strategy of gray wolves consists of three main stages: (i) tracking and approaching the prey, (ii) encircling and exhausting it, and (iii) launching a final coordinated attack. These stages are algorithmically mapped to exploration, encircling, and exploitation phases in GWO.

Assuming the dimension of the solution space in the GWO algorithm is d and the gray wolf population size is N, the position of the i-th gray wolf is expressed in Equation 19:

$$X_i = \{X_i^1, X_i^2, \dots\dots, X_i^d\}, \qquad i = 1,2, \dots, N \tag{19}$$

In GWO, the best, second-best, and third-best solutions are denoted as $\alpha, \beta,$ and δ, respectively, while the remaining individuals are classified as ω. The position of the α-wolf represents the estimated location of the prey, i.e., the best current solution. The encircling mechanism, which mimics the wolves' strategy to restrict prey movement, is mathematically formulated as follows:

$$\vec{D} = \left|\vec{C} * \overrightarrow{X_p}(t) - \vec{X}(t)\right| \tag{20}$$

$$\vec{X}(t+1) = \overrightarrow{X_p}(t) - \vec{A} * \vec{D} \tag{21}$$

Where t is the current iteration, $\vec{A}$ and $\vec{C}$ are the coefficient vectors, ($\overrightarrow{X_p}$) is the location vector of the prey and $\vec{X}$ is the location vector of the grey wolf. $\vec{A}$ and $\vec{C}$ vectors are calculated in Equation 22 and 23, respectively:

$$\vec{A} = 2 * \vec{a} * \overrightarrow{r_1} - \vec{a} \tag{22}$$

$$\vec{C} = 2 * \overrightarrow{r_2} \tag{23}$$

Here the components of $\vec{a}$ are linearly decremented from 2 to 0 over the iterations, and r_1, r_2 are random vectors in (0, 1) [24].

In nature, gray wolves locate and encircle their prey under the leadership of the α-wolf, with assistance from the β- and δ-wolves. In the context of optimization, the exact location of the global optimum is unknown; thus, the top three solutions-α, β, and δ-serve as guides to approximate its position. The remaining wolves, including the ω group, update their positions, accordingly, enabling the population to converge toward the optimal solution. This leadership-based hierarchy ensures that the top solutions are preserved while others adjust based on their influence [24]. This behavior is mathematically expressed by the following equations (Equations 24-30), and the overall flow of the GWO algorithm is illustrated in Figure 7.

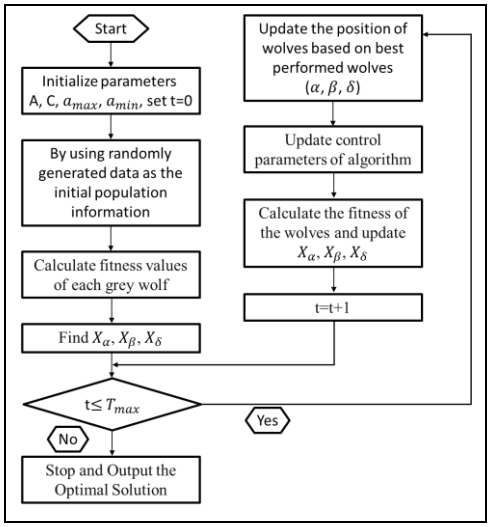


Figure 7. Flow chart of GWO algorithm [29].

$$D_\alpha = |C_1 - X_\alpha(t) - X(t)| \quad (24)$$

$$D_\beta = |C_2 - X_\beta(t) - X(t)| \quad (25)$$

$$D_\delta = |C_3 - X_\delta(t) - X(t)| \quad (26)$$

$$X_1 = X_\alpha - A_1 * D_\alpha \quad (27)$$

$$X_2 = X_\beta - A_2 * D_\beta \quad (28)$$

$$X_3 = X_\delta - A_3 * D_\delta \quad (29)$$

$$X(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (30)$$

3 Results and discussion

In this study, the shrinkage pressure, maximum equivalent stresses, and total cost, shown in Figure 8, were calculated analytically. Based on the analytical results, detailed statistical analyses were performed, and multi-objective weighted optimization was performed using the grey wolf algorithm. Details of the statistical results and the optimization process's results according to each performance criterion are described below.

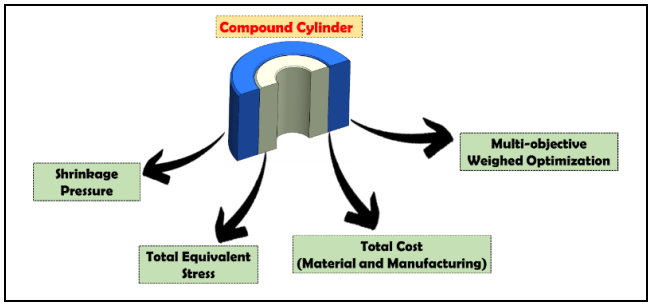


Figure 8. Output parameters and optimization of this study.

3.1 Shrinkage pressure

The shrinkage pressures of 81 different compound cylinders working under 350 MPa ultra-high internal pressure are given in Table 3. The highest shrinkage pressure was obtained at 175 MPa in the 9th design. The lowest shrinkage pressure was obtained as 11.1 MPa in the 73th design. In order to determine the effects of design variables on the shrinkage pressure variance analysis (ANOVA) were performed. To interpret the results of the ANOVA, $P-value$ and contribution ratios are usually evaluated, respectively. The $P-value$ is known as a measure of significance. A small P-value (typically less than 0.05) indicates a statistically significant difference between the means of the groups. The contribution ratio measures the proportion of the total variation in the response variable explained by a given independent variable. A high contribution ratio indicates that the independent parameter has a strong influence on the output, while a low contribution rate indicates a weak influence. The ANOVA table for the shrinkage pressure results is given in Table 4. The $P-value$ of all input parameters in the table is less than 0.05. This result shows that the input parameters have significant effects on the shrinkage pressures. The parameter with the highest contribution to the shrinkage pressure was shrinkage allowance with a rate of 47.09%. The findings of this study agree with an earlier study [5], which also showed the importance of the shrinkage allowance on the von-mises stress of the inner and outer cylinder.

Table 3. Shrinkage pressure results.

Exp.	p (MPa)	Exp.	p (MPa)	Exp.	p (MPa)
1	41.3	29	55.6	57	59.8
2	82.7	30	83.4	58	26.1
3	124.0	31	36.2	59	52.2
4	53.2	32	72.3	60	78.3
5	106.4	33	108.5	61	28.9
6	159.6	34	39.9	62	57.8
7	58.3	35	79.9	63	86.8
8	116.7	36	119.8	64	15.2
9	175.0	37	19.5	65	30.5
10	25.6	38	38.9	66	45.7
11	51.3	39	58.4	67	22.3
12	76.9	40	28.2	68	44.5
13	36.8	41	56.5	69	66.8
14	73.6	42	84.7	70	26.2
15	110.4	43	33.0	71	52.3
16	42.7	44	66.0	72	78.5
17	85.5	45	99.0	73	11.1
18	128.2	46	13.5	74	22.2
19	16.7	47	27.0	75	33.4
20	33.4	48	40.5	76	17.3
21	50.1	49	20.8	77	34.6
22	25.6	50	41.7	78	51.9
23	51.1	51	62.5	79	21.1
24	76.7	52	25.3	80	42.2
25	30.8	53	50.6	81	63.3
26	61.7	54	76.0		
27	92.5	55	19.9		
28	27.8	56	39.9		

Table 4. The ANOVA table for the shrinkage pressure results.

Source	F-value	P-value	Cont.%	Remarks
R_1 (mm)	539.5	<0.0001	15.1	Significant
T_1	581.7	<0.0001	16.2	Significant
T_2	357.8	<0.0001	10.0	Significant
Shrinkage allowance	1681.4	<0.0001	47.1	Significant
R_1* T_1	61.6	<0.0001	3.4	Significant
R_1* T_2	6.8	<0.0001	0.4	Significant
R_1* Shrinkage allowance	44.9	<0.0001	2.5	Significant
T_1* Shrinkage allowance	48.4	<0.0001	2.7	Significant
T_2* Shrinkage allowance	29.8	<0.0001	1.7	Significant
Error			0.7	
Total			100.0	

The shrinkage allowance tolerance levels selected in this study are relatively small, and controlling manufacturing is quite tricky. However, it is the most influential parameter on the pressure at the interface. Therefore, the shrinkage allowance needs to be set very precisely, and it should be as high as possible when manufacturing compound cylinders that operate under ultra-high internal pressures. The lowest contribution in terms of input parameters was the outer radius of the outer cylinder, with 10.0%. Interaction effects of the parameters were found to be low in the variance model. The error rate of the ANOVA analysis was calculated as 0.7%

A main effects plot is a type of graph used in statistics and data analysis to represent the relationship between input parameters and results visually. It is used to understand the effect of an input parameter on the result while other variables are held constant. The main effects plot for the shrinkage pressure is given in Figure 9.

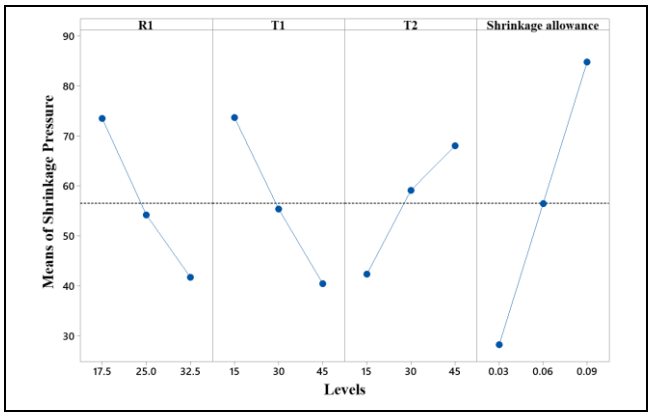


Figure 9. The main effects plot for the shrinkage pressure.

The effects of the parameters on the shrinkage pressure were linearly increasing or decreasing. While the inner radius (R_1) and thickness of the inner cylinder (T_1) are inversely proportional to the shrinkage pressure, the thickness of the outer cylinder (T_2) and shrinkage allowance (δ) are proportional to the shrinkage pressure. While the average interfacial pressure was 73 MPa at the 17.5 mm R_1, the average interfacial pressure decreased by 43% to 41 MPa when the R_1 was 32.5. The increase of T_2 caused an increase in the shrinkage pressure. However, increasing T_2 causes an increase in the amount of material, and this creates a disadvantageous situation regarding the total cost. The primary purpose of this study is to optimize by considering the total cost while doing this kind of geometric dimensioning. Considering the shrinkage allowance, the average interfacial pressure was 29 MPa with a δ of 0.03 mm, but this value increased by 193% to 85 MPa with a δ of 0.09 mm. It is desirable to increase the shrinkage pressure, but for safety reasons, the total stress in the cylinders must be calculated.

The R-squared value is a statistical measure of how well the regression curve approximates the actual data points. The R-square value ranges from 0 to 1, where 0 indicates that the model explains none of the variability around the mean of the output parameters data, and 1 indicates that the model explains all of the variability around the mean of the output parameters. A high R-squared value indicates the predictability of the outcome with a high success rate using the input parameters. R-squared adjusted is a modified version of R-squared, a statistical measure of the fit of a linear regression model. R-squared adjusted is used to compare models with more than one independent variable. R-square and R-square adjusted values are 0.983 and 0.980, respectively. It is concluded that the parameters have high predictability on the shrinkage pressure.

An interaction plot is a type of plot used to visualize the relationship between two or more input parameters and the result. It is a way to see how the effect of one parameter on the result depends on the levels of another factor. The 6 interaction graphs obtained for the shrinkage pressure are shown in Figure 10. First of all, it can be said that all interactions are proportional and as they do not coincide each other, there is not an interaction between the parameters. However, it can be observed that the effect of changing inner cylinder thickness (**T_1**) on shrinkage pressure is most pronounced when the shrinkage allowance is at its highest value. Again, it was observed that when the thickness of outer cylinder is its minimum level, there is not any effect of inner cylinder thickness.

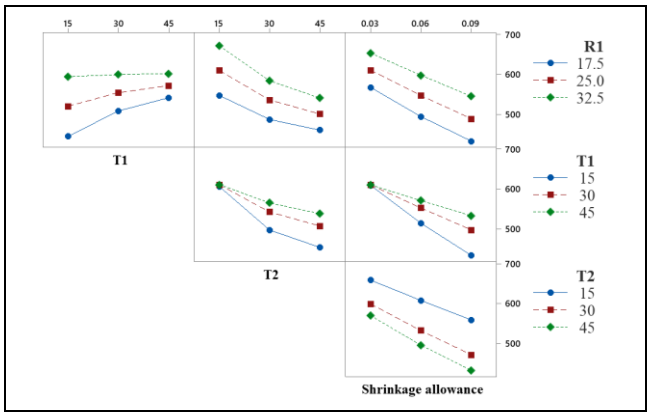


Figure 10. The interaction graphs for shrinkage pressure.

3.2 Maximum equivalent stress in the outer cylinder

The maximum equivalent stresses occurring in the outer cylinders under ultra-high internal pressure of 350 MPa are given in Table 5. The outer cylinders are generally manufactured from low-strength materials. Therefore, it is absolutely important to calculate the stresses occurring in the outer cylinder. Designing the outer cylinder as unsafe may cause sudden fatigue damage. The highest stress was obtained as 668.5MPa in the 57th design. The lowest equivalent stress was obtained as 131.9 MPa in the 25th design.

Table 5. The maximum equivalent stresses in the outer cylinder of 81 different compound cylinders.

Exp.	σ_{outer} (MPa)	Exp.	σ_{outer} (MPa)	Exp.	σ_{outer} (MPa)
1	350.1	29	525.9	57	668.5
2	489.6	30	632.9	58	426.4
3	629.1	31	370.8	59	500.4
4	320.8	32	465.5	60	574.5
5	448.6	33	560.1	61	396.3
6	576.4	34	350.9	62	465.1
7	309.4	35	440.4	63	534.0
8	432.7	36	530.0	64	293.0
9	555.9	37	245.9	65	373.6
10	205.0	38	339.4	66	454.2
11	315.8	39	432.9	67	266.7
12	426.7	40	227.6	68	340.1
13	193.2	41	314.1	69	413.5
14	297.7	42	400.6	70	253.5
15	402.2	43	218.8	71	323.3
16	188.0	44	302.0	72	393.0
17	289.6	45	385.2	73	201.0
18	391.3	46	168.9	74	270.7
19	141.9	47	247.0	75	340.4
20	230.3	48	325.0	76	187.6
21	318.7	49	159.3	77	252.7
22	135.2	50	232.9	78	317.7
23	219.4	51	306.5	79	180.2
24	303.7	52	154.2	80	242.8
25	131.9	53	225.5	81	305.3
26	214.1	54	296.7		
27	296.3	55	496.2		
28	419.0	56	582.4		

The ANOVA table for the maximum equivalent stress in the outer cylinder is given in Table 6. The P-value of all input parameters in the table is less than 0.05. These results show that changing the levels of the input parameters has statistically significant effects on the equivalent stress of the outer cylinder.

Table 6. The ANOVA table for the maximum equivalent stress in the outer cylinder.

Source	F-value	P-value	Cont.%	Remarks
R1 (mm)	805.6	<0.0001	2.1	Significant
T1	6488.6	<0.0001	61.8	Significant
T2	46.1	<0.0001	2.47	Significant
Shrinkage allowance	1090.0	<0.0001	30.9	Significant
R1* T1	19.2	<0.0001	0.1	Significant
R1* T2	23.2	<0.0001	0.2	Significant
R1* Shrinkage allowance	5.5	<0.0001	0.8	Significant
T_1* T_2	22.8	<0.0001	0.8	Significant
T1* Shrinkage allowance	136.2	<0.0001	0.4	Significant
T2* Shrinkage allowance	16.2	<0.0001	0.1	Significant
Error			0.23	
Total			100.0	

However, the thickness of the inner cylinder (T_1) was the most important parameter, with a contribution rate of 61.8%, and the effects of the other parameters were less pronounced. While the contribution rate of the δ was calculated as 30.1%, the effect of R_1 and T_2 seems nearly no effect on its stress value with a contribution rate of 2.1% and 2.4%, respectively. The main effects plot of the parameters is given in Figure 11.

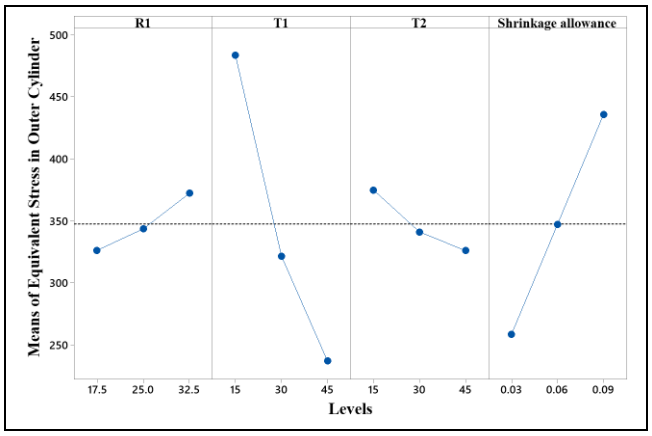


Figure 11. The main effects plot for the maximum equivalent stress in the outer cylinder.

As can be seen from the figure, an increase in the R_1 and a decrease in T_2 parameters causes a slight increase in the stress level. The stress level decreases significantly with the increase in the T_1 parameter. Again, increasing $\boldsymbol{\delta}$ caused an increase in the stress level. An interesting result is that there is no need to increase the thickness of the outer cylinder to reduce the stress level in the outer cylinder. This information is important for designing the compound cylinders as safely and economically.

The R-squared and R-squared adjusted values are 0.997 and 0.996, respectively. R-square adjusted values of 0.7 and above are accepted in engineering problems. So, it is concluded that the parameters have high predictability on the maximum equivalent stress in the outer cylinder. When the interaction plots given in Figure 12 are examined, it is seen that there is only a slight interaction between the parameters of R_1 and δ. When the level of δ was 0.03 mm changing of R_1 affected the stress level but when it is 0.09, changing of R_1 did not affect the stress of outer cylinder.

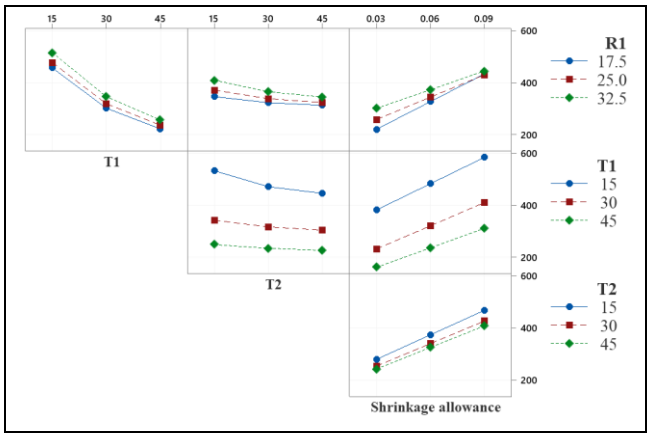


Figure 12. The interaction graphs for maximum equivalent stress of outer cylinders.

3.3 Maximum equivalent stress in the inner cylinder

The maximum equivalent stresses occurring in the inner cylinder of 81 different compound cylinders when internal pressure was 350 MPa are given in Table 7.

Table 7. The maximum equivalent stresses in the inner cylinder of 81 different compound cylinders.

Exp.	σ_{inner} (MPa)	Total Cost ($)	Exp.	σ_{inner} (MPa)	Total Cost ($)	Exp.	σ_{inner} (MPa)	Total Cost ($)
1	600.6	534	29	606.0	395	57	636.4	330
2	503.5	534	30	528.9	395	58	651.1	386
3	416.5	534	31	592.1	479	59	566.2	386
4	530.0	686	32	493.9	479	60	486.2	386
5	416.0	686	33	406.8	479	61	597.4	454
6	331.9	686	34	551.1	584	62	506.7	454
7	500.5	878	35	447.5	584	63	424.6	454
8	382.9	878	36	362.1	584	64	701.5	506
9	311.0	878	37	652.9	654	65	664.1	506
10	606.4	986	38	609.9	654	66	627.2	506
11	555.8	986	39	567.9	654	67	639.0	574
12	507.1	986	40	602.0	759	68	586.0	574
13	565.5	1179	41	541.7	759	69	534.8	574
14	495.7	1179	42	484.4	759	70	605.1	654
15	431.5	534	43	574.9	883	71	544.3	654
16	544.3	534	44	506.1	883	72	486.3	654
17	465.5	534	45	442.3	883	73	669.2	727
18	395.7	686	46	637.1	989	74	645.2	727
19	607.4	686	47	610.0	989	75	621.6	727
20	576.3	686	48	583.4	989	76	631.0	806
21	545.8	878	49	605.2	1114	77	594.6	806
22	580.9	878	50	564.4	1114	78	558.9	806
23	534.3	878	51	524.7	1114	79	607.8	898
24	489.7	986	52	586.1	1259	80	564.0	898
25	565.3	986	53	537.3	1259	81	521.5	654
26	510.1	986	54	490.5	1259			
27	458.0	1179	55	771.5	330			
28	686.5	1179	56	703.2	330			

The highest stress was obtained in experiment 55 as 771.5 MPa. The lowest equivalent stress was obtained in the 9th design as 311 MPa. However, since the outer cylinder stress exceeded the allowable stress in the 9th design, the lowest equivalent stress was 395 MPa in the 18th design. The ANOVA table is given in Table 8. The P-value of all input parameters in the table is less than 0.05. This result shows that all input design parameters have significant effects on the equivalent stress in the inner cylinder. Except for the thickness of the inner cylinder (T_1), all design parameters exhibit similar effects on the stress level. The shrinkage allowance (δ) contributes the most with a ratio of 32.7%, while the thickness of the outer cylinder (T_2) and the inner radius of the inner cylinder (R_1) have effects of 27.4% and 22.3%, respectively.

Table 8. The ANOVA table for the maximum equivalent stress in the inner cylinder.

Source	F-value	P-value	Cont.%	Remarks
R1 (mm)	1199.8	<0.0001	22.3	Significant
T1	333.3	<0.0001	6.2	Significant
T2	1476.6	<0.0001	27.4	Significant
Shrinkage allowance	1757.2	<0.0001	32.7	Significant
R1* T1	81.5	<0.0001	3.0	Significant
R1* T2	19.5	<0.0001	0.7	Significant
R1* Shrinkage allowance	7.2	<0.0001	0.3	Significant
T_1* T_2	70.7	<0.0001	2.6	Significant
T1* Shrinkage allowance	97.6	<0.0001	3.6	Significant
T2* Shrinkage allowance	15.5	<0.0001	0.5	Significant
Error			0.4	
Total			100.0	

These results also verified the results of a previous study conducted according to Taguchi L9 orthogonal design [3]. The parameters have high predictability on the maximum equivalent stress in the inner cylinder. Because R-square and R-square adjusted values are 0.976 and 0.972, respectively. The main effects plot for the maximum equivalent stress in the inner cylinder is given in Figure 13.

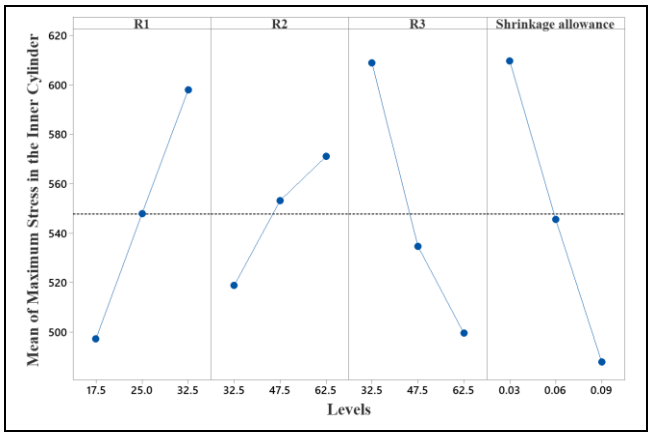


Figure 13. The main effects plot for the maximum equivalent stress in the inner cylinder.

While increasing R_1 caused a significant increase in the stress value, conversely, increasing T_2 and δ reduced the stress level considerably. Despite its minimal effect, interestingly, an increase in T_1 caused a higher stress level. That is because as the inner cylinder wall thickness increases, the outer cylinder wall thickness decreases and therefore the compressive stress in the inner cylinder decreases. The reduction in equivalent stress observed in the compound cylinder is consistent with the findings of Aydın et al. who demonstrated that outer layers significantly lower the tensile stresses in the inner cylinder under internal pressure [3],. When interaction plots given in Figure 14 were examined, there is an interaction between T_1 and δ. T_1 does not have any effect when δ has 0.03 mm. In the design of compound cylinders, T_1 is generally taken at maximum values in order to make a safe design. However, the results showed that it should be taken with minimum dimensions. The inner cylinders are generally manufactured from high-strength and overcasting materials. Therefore, designing compound cylinders to have minimum T_1 will also provide a more economical solution.

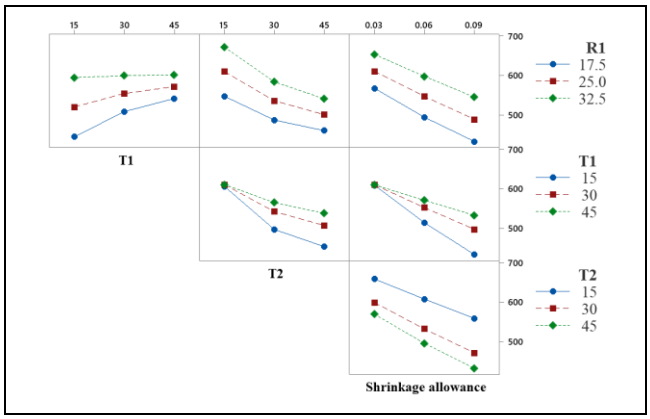


Figure 14. The interaction graphs for maximum equivalent stress of inner cylinders.

Again, for a more economical design, instead of increasing T_2, it is recommended to select the δ value at higher levels so as not to cause yield in the outer cylinder. The smaller R_1 reduces the stress of inner cylinder but for a given volume capacity, the length of the cylinders should be increased as the radius decreases. Therefore, an optimization is required for the economical design of the compound cylinders.

3.4 Determination of optimum parameter levels using the constrained Grey Wolf Algorithm

Before the optimization process, reference parameter levels were determined for comparison. The reference parameter levels are the parameter levels that give the minimum stress in the inner cylinder (18th design in Table 7) and the lowest total cost (58th design in Table 7). The designs with an equivalent stress in the outer cylinder above the safety yield strength (430 MPa) are excluded from the full factorial design table. These reference values are called Ref_1 and Ref_2. The parameter levels of Ref_1 and Ref_2 and the results obtained at these two reference levels are shown in Table 9.

Table 9. Parameter levels, maximum equivalent stresses, and total cost of reference compound cylinders.

	R_1 (mm)	T_1 (mm)	T_2 (mm)	δ (mm)	σ_{inner} (MPa)	σ_{outer} (MPa)	Total Cost ($)
Ref_1	17.5	30	45	0.09	395	391	1413
Ref_2	32.5	15	30	0.03	651	426	386

The objective functions for the equivalent stress in the inner cylinder and total cost are given by eq. 31 and 32 are given respectively

$$\begin{aligned} &Equivalent\ stress\ of\ inner\ cylinder\ (MPa) \\ &= 564.7 + 14.14 * R_1 + 2.995 * T_1 \\ &- 7.779 * T_2 - 4194 * \delta - 0.0059 \\ &* R_1^2 - 0.0366 * T_1^2 + 0.0867 * T_2^2 \\ &+ 3615 * \delta^2 - 0.1986 * R_1 * T_1 \\ &- 0.0978 * R_1 * T_2 + 29.33 * R_1 * \delta \\ &+ 0.08812 * T_1 * T_2 + 54.36 * T_1 * \delta \\ &- 21.11 * T_2 * \delta \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} Total\ Cost\ (\$) &= 921 - 90.36 * R_1 + 48.99 * T_1 + 17.88 \\ &* T_2 + 2.272 * R_1^2 + 0.2032 * T_1^2 \\ &+ 0.0544 * T_2^2 - 1.6019 * R_1 * T_1 \\ &- 0.6196 * R_1 * T_2 + 0.1088 * T_1 * T_2 \end{aligned} \quad (32)$$

In this study, the optimization process was conducted by applying weighting to the mathematical models of output

parameters. This weighting approach facilitates the simultaneous evaluation of multiple objectives within the optimization process. By assigning a specific level of importance to each objective, weighting enables the integration of all objectives into a single objective function. Mathematically, the total weighted objective function can be represented as:

$$F_{total} = w_1 * f_1(x) + w_2 * f_2(x) \quad (33)$$

Where w_i is the weight assigned to the objective function f_i and these weights reflect the degree of priority or importance between the objectives. In the present study, two distinct performance criteria weighted to execute the optimization process.

The weight ratios for the two objective functions total cost and equivalent stress of inner cylinder were optimized for finding the best weight ratio. The optimization of the weight ratios was done as follows.

Optimum parameter levels were obtained with a total of nine different weight ratios starting from 90% (σ)-10% ($Total\ Cost$) up to 10% (σ)-90% ($Total\ Cost$). σ and Total Cost (T.C.) are the objective functions for the equivalent stresses in the inner cylinder and total cost of compound cylinders, respectively. Equivalent stresses in the inner cylinder and the total costs were calculated using nine different weighed optimization as shown in Table 10.

Table 10. The parameter levels and results obtained for all weight ratios.

Exp. No	Weight Ratios	R_1	T_1	T_2	δ	σ_{inner} (MPa)	Total Cost
1	0.9*σ + 0.1*T.C.	17.50	15	50.39	0.062	369	970
2	0.8*σ + 0.2*T.C.	30.43	23.25	58.24	0.090	423	664
3	0.7*σ + 0.3*T.C.	26.07	15	46.16	0.055	467	535
4	0.6*σ + 0.4*T.C.	26.63	15	39.85	0.051	500	473
5	0.5*σ + 0.5*T.C.	26.22	15	30.70	0.045	547	415
6	0.4*σ + 0.6*T.C.	26.10	15	23.62	0.040	600	373
7	0.3*σ + 0.7*T.C.	25.83	15	16.67	0.034	668	336
8	0.2*σ + 0.8*T.C.	25.28	15	11.74	0.030	727	314
9	0.1*σ + 0.9*T.C.	24.67	15	10.53	0.03	736	313

Since the two performance criteria do not have same units, the equivalent cylinder of the inner cylinder and total cost was normalized according to Eq. 34. Hence the equivalent stress and normalized cost results obtained for nine different weight ratios were calculated as shown in Table 11.

$$|x|_{normalized} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (34)$$

After the normalization process the results of the equivalent stresses and total costs were shown in the same graph as in Figure 15. The optimum weight ratios were determined as the intersection point of two-line graphs (Stress and Total cost). As a result, the optimum weight ratios were calculated as 67% for equivalent stress and 33% for the total cost.

The optimization was done again by using the optimum weight ratio. The optimization results with optimum weight ratio were given in Table 12.

Table 11. The equivalent stress and normalized cost results.

Weight Ratios	σ_{inner} (normalized)	Total Cost $_{normalised}$
0.9*σ + 0.1*T.C.	0.000	1.000
0.8*σ + 0.2*T.C.	0.147	0.534
0.7*σ + 0.3*T.C.	0.267	0.338
0.6*σ + 0.4*T.C.	0.357	0.244
0.5*σ + 0.5*T.C.	0.485	0.155
0.4*σ + 0.6*T.C.	0.629	0.091
0.3*σ + 0.7*T.C.	0.815	0.035
0.2*σ + 0.8*T.C.	0.975	0.002
0.1*σ + 0.9*T.C.	1.000	0.000

Table 12. Optimization results (comparison with reference compound cylinders).

	σ_{inner}(MPa)	Total Cost ($)
Ref_1	395	1413
Ref_2	651	386
Optimum Levels (Opt_Weighted)	477	514

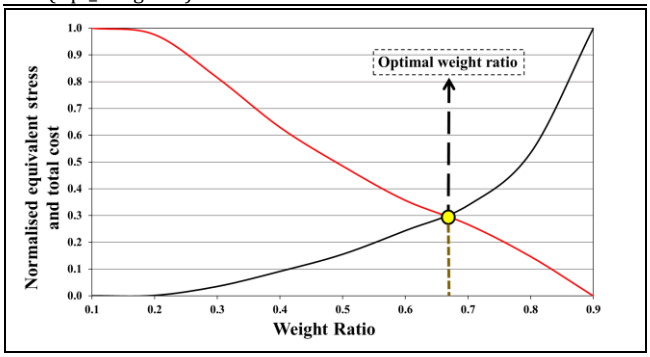


Figure 15. The graphical representation of the results for the ten weight ratios.

The optimum values of $\mathbf{R_1}$, $\mathbf{T_1}$, $\mathbf{T_2}$ and $\boldsymbol{\delta}$ were 26.42 mm, 15 mm, 44.66 mm and 0.054 mm, respectively. The results were compared with the parameter levels which gives minimum equivalent stress in the inner cylinder (Ref_1) and the parameter levels which gives minimum total cost of compound cylinder (Ref_2). The optimization led to a 20% increase in maximum equivalent stress; however, this value remains within safe design limits and is accompanied by a remarkable 2.75-fold reduction in total cost. This configuration offers a well-balanced and highly efficient solution. This result shows that it is possible to achieve significant cost reduction by allowing some increase in stress. Compared to the Ref_2, there is a significant reduction in equivalent stress level of 26.7%. As a result, thanks to multi-objective optimization, both an economical and safe design has been achieved.

4 Conclusions

The design of compound thick-walled cylinders is very important to obtain safety and economical solutions. Cylinders designed with high safety coefficients are manufactured at very high costs. Therefore, optimum design parameter levels should be calculated. The main objective of this study is firstly determine the effect of geometrical design parameters of compound cylinders on their stress values. Secondly determine the optimum design parameter levels of compound thick-walled cylinders. As a result of the study, the optimum dimensions of compound thick-walled cylinders with low stress levels and economical cost were determined. The outputs of the study are summarized below:

1) The most effective parameter of the shrinkage pressure was the shrinkage allowance (δ). Very small changes in shrinkage allowance cause significant changes in shrinkage pressure and stress levels,
2) The parameter with the highest contribution to the equivalent stress in the outer cylinder was the thickness of the inner cylinder (T_1) and there is nearly no effect of the thickness of the outer cylinder on its stress. Therefore, there is no need to increase the thickness of the outer cylinder to reduce the stress level of its,
3) Except for the thickness of the inner cylinder (T_1), almost all parameters affect the maximum stresses of the inner cylinder to almost the same degree. Therefore, the T_1 value should be chosen as low as possible to achieve a more economical design,
4) The smaller inner cylinder radius (R_1) reduces the stress of inner cylinder but for a given volume capacity, the length of the cylinders should be increased as the radius decreases. Therefore, an optimization is required for the economical design of the compound cylinders,
5) For a more economical design, instead of increasing thickness of the outer cylinder (T_2), it is recommended to select the shrinkage allowance (δ) value at higher levels so as not to cause yield in the outer cylinder,
6) As a result of multi-objective weighted optimization to get the optimal solution in terms of safety and cost, the optimum weight ratios were calculated as 67% for equivalent stress and 33% for the total cost,
7) As a result of the optimization, the maximum equivalent stress in the inner cylinder increased by 20% (395 MPa to 477 MPa) while the total cost decreased by 2.7 times (1413$ to 514$),
8) Using the optimum design parameters instead of the parameters that give the minimum cost, there is a significant reduction in the equivalent stress of the inner cylinder by 26.7% (651 to 477 MPa).

5 Authors contribution statements

Stress calculations, design, and statistical analysis were carried out by Mevlüt Aydın and Mevlüt Türköz. Abdullah Çakan carried out optimization procedures and algorithms.

6 Ethics committee approval and conflict of interest statement

"There is no need to obtain an ethics committee approval in the manuscript".

"There is no conflict of interest with any person/institution in the manuscript".

7 References

[1] Phalguna BN. "Stress and failure analysis of thick walled cylinder with oblique hole". *Internatioanl Journal of Engineering Research and Technology*, 6(8), 36-45, 2017.
[2] Yuanhan W. "Torsion of a thick-walled cylinder with an external crack: boundary collocation method". *Theoretical and applied fracture mechanics*, 14(3), 267-273,1990.
[3] Aydın M, Türköz M, Yapan YF. "Ultra Yüksek Basınçta Çalışan Kalın Cidarlı Silindirlerin Tasarımına Etki Eden Parametrelerin Sayısal ve Analitik Olarak Araştırılması". *Konya Journal of Engineering Sciences*, 10(2), 412-424, 2022.
[4] Booker JD, Truman CE, Wittig S, Mohammed Z. "A comparison of shrink-fit holding torque using probabilistic, micromechanical and experimental approaches". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 218(2),175-187, 2004.
[5] Ozturk F. "Finite-element modelling of two-disc shrink fit assembly and an evaluation of material pairs of discs". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 225(2),263-273, 2011.
[6] Aydin M, Yapan, YF, Turkoz, M. "Investigation on Effect of Shrinkage Allowance to the Fatigue Life of Compound Cylinders Operating at High Pressure". *International Conference on Engineering Technologies*, 370-374, 2020.
[7] Ugural AC, Saul KF. Advanced mechanics of materials and applied elasticity. Pearson Education, 2011.
[8] Zhang Y, McClain B, Fang XD. "Design of interference fits via finite element method". *International Journal of Mechanical Sciences*, 42(9),1835-1850, 2000.
[9] Aydın M, Türköz M. "A study on the effect of the roller burnishing process on the axial fatigue performance and surface integrity of AISI 4340 steel". *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44(6), 224, 2022.
[10] Paredes M, Naoufel N, Marc S. "Study of an interference fit fastener assembly by finite element modelling, analysis and experiment". *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 6,171-177, 2012.
[11] Benuzzi D, Donzella G. "Prediction of the press-fit curve in the assembly of a railway axle and wheel". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 218, 51-65, 2004.
[12] Özel A, Temiz Ş, Aydin MD, Şen S. "Stress analysis of shrink-fitted joints for various fit forms via finite element method". *Materials & design*, 26(4), 281-289, 2005
[13] Aydın M, Türköz M. "Effect of shrink fit process on total equivalent stress and total amounf of material". *International Conference on Engineering Technologies*, 405-408, 2021.
[14] Akay ME, Ridvanogullari A. "Optimisation of machining parameters of train wheel for shrink-fit application by considering surface roughness and chip morphology parameters". *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23(5), 1194-1207, 2020.
[15] Campos UA, David EH. "Simplified Lamé's equations to determine contact pressure and hoop stress in thin-walled press-fits". *Thin-Walled Structures*, 138, 199-207, 2019.
[16] Wang X, Lou Z, Wang X, Hao X, Wang Y. "Prediction of stress distribution in press-fit process of interference fit with a new theoretical model". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 233(8), 2834-2846, 2019.
[17] Wang X, Lou Z, Wang X, Xu C. "A new analytical method for press-fit curve prediction of interference fitting parts". *Journal of Materials Processing Technology*, 250, 16-24, 2017.

[18] Wang S, Zhu Q, Zhao JH, Yue XP, Jiang YJ. "Elastoplastic assessment of limiting internal pressure in thick-walled cylinders with different tension-compressive response". *Strength of Materials*, 51, 508-519, 2019.
[19] Zhu Q, Wang S, Zhang DF, Jiang YJ, Yue X. "Elastoplastic analysis of ultimate bearing capacity for multilayered thick-walled cylinders under internal pressure". *Strength of Materials*, 52, 521-531,2020.
[20] Harvey JF. Theory and design of pressure vessels. 2nd ed. New York, USA, VNR Company, 1991.
[21] Groover MP. *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. 4th ed. Danvers, USA, *John Wiley & Sons*, 2010.
[22] Stephenson DA, Agapiou JS. Metal cutting theory and practice. 3rd ed. Florida, USA, CRC press, 2018.
[23] Chung C, Wang PC, Chinomona B. "Optimization of turning parameters based on tool wear and machining cost for various parts". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(7), 5163-5174,2022.
[24] Mirjalili S, Mirjalili SM, Lewis A. "Grey wolf optimizer". *Advances in Engineering Software*, 69, 46-61, (2014).
[25] Şen MA, Kalyoncu M. "Grey wolf optimizer based tuning of a hybrid LQR-PID controller for foot trajectory control of a quadruped robot". *Gazi University Journal of Science*, 32(2), 674-684, 2019.
[26] Baş E, İhsan E. "Gri kurt optimizasyonu ve krill sürü optimizasyon algoritmasının performans analizi ve karşılaştırması". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi,* 29(7), 711-736, 2023.
[27] Gürkan E, Güner A. "FV sistemlerde kısmi gölgeleme koşullarında maksimum güç noktası takibi için metasezgisel algoritmaların karşılaştırmalı performans analizi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi,* 30(7), 891-905, 2024.
[28] Beştaş MŞ, Dinler ÖB. "Kötü amaçlı android tabanlı yazılım tespitinin trend meta-sezgisel algoritmalar ile karşılaştırılmalı analizi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi,* 31(1), 98-115, 2025.
[29] Teng ZJ, Lv J, Guo L. "An improved hybrid grey wolf optimization algorithm". *Soft computing*, 23, 6617-6631, 2019.

Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 31(7), 1164-1169, 2025

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Investigating the mechanical behavior of the human lumbar spine model by using finite element method

İnsan lomber omurgasının mekanik davranışının sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi

Berna Seval Doğan[1], *Mustafa Özkaya*[1*]

[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Natural Science, KTO Karatay University, Konya, Türkiye.
bernasevaldogan@gmail.com, mustafa.ozkaya@karatay.edu.tr

Received/Geliş Tarihi: 24.10.2024 Revision/Düzeltme Tarihi: 20.03.2025 doi: 10.5505/pajes.2025.93395
Accepted/Kabul Tarihi: 21.04.2025 Research Article/Araştırma Makalesi

Abstract

Understanding the mechanical behavior of the human lumbar spine is important in spinal disorders and treatment. For this reason, spinal mechanics is examined in many biomechanical studies. The aim of this study is to examine the mechanical behavior of the human lumbar spine with the finite element method and to verify it by comparing it with experimental data in the literature. In addition, by trying different models, it is aimed to determine which structure in the spine functions under which loads and to show new researchers how these processes are applied. The human L1-L5 vertebrae were used. There were two models; one had facets as a single body in each without ligaments and the second one had facets as paired bodies at opposing bones with ligaments. Each intervertebral disc included nucleus pulposus, annulus fibrosus, and two end plates. Flexion, extension, left lateral bending, and right lateral bending loads were applied to the models with 4 Nm moment. The range of motions of each spinal segment in degrees were used as the analysis output and compared to the experimental data in the literature to validate the results. According to the results, modeling the facets as a single body caused excessive stiffness, while modeling them as facet pairs at opposing bones caused excessive movement. It can be said that using a model which, has paired facet joints and ligaments, provided converged range of motion values in each L1-L5 spinal segment under flexion/extension and left/right lateral bending moments.

Keywords: Lumbar spine, Biomechanics, Finite element method.

Öz

İnsan lomber omurgasının mekanik davranışının anlaşılması, omurga rahatsızlıklarında ve tedavisinde önemli bir yer tutmaktadır. Bu sebeple pek çok biyomekanik çalışmada omurga mekaniği incelenmektedir. Bu çalışmanın amacı, insan lomber omurgasının mekanik davranışını sonlu elemanlar yöntemi ile incelemek ve literatürdeki deneysel veriler ile karşılaştırarak doğrulamaktır. Ayrıca, farklı modeller deneyerek, omurgada hangi yapının hangi yükler altında işlev gördüğünü belirlemek ve bu süreçlerin nasıl uygulandığını yeni araştırmacılara göstermektir. Bu çalışmada insan L1-L5 omurgası kullanılmıştır. İlki, faset eklemlerin tek bir gövde olarak modellendiği ligamentsiz bir omurga modeli ve ikincisi faset eklemlerin karşılıklı kemiklerde iki farklı gövde çifti olarak modellendiği ligamentli omurga modeli olmak üzere iki farklı model incelenmiştir. Her bir intervertebral disk, nükleus pulpozus, anülüs fibrozus ve iki adet end-plate'ten oluşmaktadır. Modellere, fleksiyon, ekstansiyon, sola eğilme ve sağa eğilme yükleri 4 Nm'lik moment ile uygulanmıştır. Her bir spinal segmentin derece cinsinden dönme miktarı analiz çıktısı olarak kullanılmış ve doğrulama için literatürdeki deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, fasetleri tek bir gövde olarak modellemek aşırı direngenliğe neden olurken, karşıt kemiklerde faset çiftleri olarak modellemek aşırı harekete neden oldu. Fasetlerin karşılıklı kemiklerde faset çiftleri olarak modellendiği ve ligamentleri olan bir modelin, fleksiyon/ekstansiyon ve sola/sağa eğilme momentleri altında her bir L1-L5 spinal segmentinde deneysel verilere yakınsayan dönme miktarı değerleri sağladığı söylenebilir.

Anahtar kelimeler: Lomber omurga, Biyomekanik, Sonlu elemanlar metodu.

1 Introduction

The spine is a structure that helps to keep the human body standing and provides an ability to move in three axes. From the mechanical perspective, each vertebra in the spine acts as levers, intervertebral discs and facet joints as pivots, ligaments as passive restrictors, and muscles as actuators. [1] Due to its location, the lumbar spine is the most load-bearing section of the spine. For this reason, the lumbar vertebrae have larger surface areas compared to other vertebrae. Intervertebral discs and facets, which serve as pivots, ensure force transmission and damping between the vertebral bodies. They enable the flexion and bending of the spine and assist in the absorption of shock impacts. There are seven different ligaments acting as connectors and restrictors in spinal movement.

Due to the large loads that they bear, spinal disorders and injuries are frequently observed in the lumbar vertebrae. Due to this, it has been an important topic for studies [2]-[4]. The understanding of the mechanics of these disorders that occur because of large loads on the lumbar spine is also crucial for treatment. To achieve this, experimental and numerical methods are conducted. Experimental studies are conducted in laboratory environments where the load-displacement behavior of spinal segment is simulated under physiological loading or many different loading conditions. In this type of studies, human or animal cadavers [5]-[7] or artificial bone samples [8] may be used. However, due to the complex geometry of the lumbar spine, it is generally difficult to investigate mechanical data such as stress and strain on spinal structures in experimental studies.

*Corresponding author/Yazışılan Yazar

Obtaining stress and strain data effectively and easily is achieved by implemented finite element (FE) method, which is a numerical procedure and allows the examination of the mechanical effects of material and geometric diversity of the structures. By using the FE method, it is possible to investigate the mechanical effects of various spinal disorders and deformities or surgical treatment methods of these disorders in a faster and easier manner [9]-[11]. From here, the aim of this study is to understand the mechanical behavior of the lumbar spine by examining it using the FE method and obtain a validated original FE model of the lumbar spine (L1-L5) by comparing it to experimental data from literature. This validated spinal model is important for future numerical studies that may investigate the mechanics of disorders, deformities, or possible treatment methods of lumbar spine. The second aim of this study is to investigate the mechanical behavior of different spine models and thus determine which structure in the spine functions under which loading conditions. With this method, it is possible to have an idea about which structures are important in approximating the real spine mechanical behavior. The difference of this study from the other studies in literature is to compare different lumbar spine models and to explain to the new researchers what they should do to obtain a validated lumbar spine model in detail.

2 Materials and methods

2.1 Generation of lumbar spine model

The 3D CAD model of the human spine can be created using various methods. In the most used approach, DICOM images obtained from CT (Computed Tomography) scans are converted into STL format using softwares such as Mimics Materialise (Materialise NV, Belgium) or 3D Slicer (3D Slicer, United States) and then transformed into a three-dimensional solid model. The present study investigates the mechanical behavior of the L1-L5 lumbar spine. The solid model of the lumbar spine examined in this study was created using an STL model obtained from CT scans which has been previously used in the study of Sengul et al [12]. The CAD model of the lumbar vertebrae was created by using Space Claim (Ansys Inc., US). Each step performed when creating the CAD model of the vertebrae from the STL model is shown in Figure 1 on the illustration of a single vertebra. The STL model of a single vertebra can be seen on Figure 1(a). The STL model shown here consists of a coarse mesh, so the creation of a solid may lead to inaccurate results in its current form. For this reason, the STL model was converted to a fine mesh STL model to better resemble an anatomically accurate bone structure. The fine STL model corresponds to the outer boundary of the cortical bone. This STL model was offset inward by 0.5 mm to create the inner boundary of the cortical bone. This offset value was assumed as 0.5 mm based on literature research [13]-[16]. Then, two 3D solid models were created for each vertebra by using these two boundary layers (Figure 1(b)). Inner one of them represents to trabecular part and the other one represents to cortical part. To create the cortical shell around the trabecular bone, the intersection of two parts was subtracted from the cortical part. By this way, the cortical shell with 0.5 mm thickness and the trabecular bone inside were obtained as in Figure 1(c).

Following bones, intervertebral discs were created in each level between the two vertebrae. Each intervertebral disc was modeled with annulus fibrosus, nucleus pulposus, and two end-plates positioned above and below them (Figure 1(d)). The endplates were created like shell elements with the thickness of 0.5 mm [14]. Determining the size of the nucleus pulposus is crucial for accurately modeling the intervertebral disc structure. When the literature is examined, the ratio of the nucleus pulposus to the total volume of the disc varies approximately from 20% to 50% depending on the condition of the disc [17]-[20]. In several studies, it has shown that the numerical results converged to experimental ones in the literature when the ratio of the nucleus pulposus to the total volume of the disc was assumed approximately 40% [1],[17]. For this reason, the nucleus pulposus in each disc were modeled to occupy approximately 40% of the disc's volume. After modeling the intervertebral discs, the facet joints located posteriorly were modeled, appropriately.

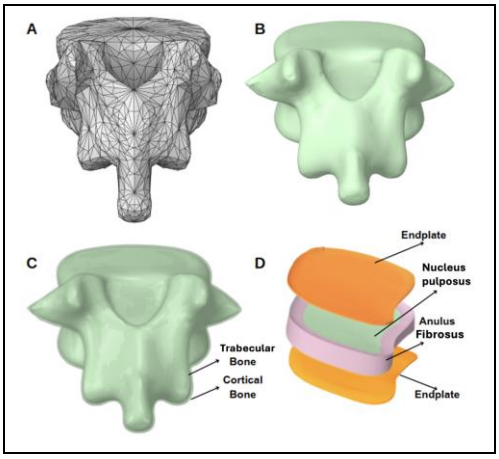


Figure 1(a): The coarse mesh STL model of a vertebra. (b): The solid cortical bone and solid trabecular bone inside it. (c): Cortical shell and solid trabecular bone. (d): The intervertebral disc.

In this study, two different spinal models were created to observe the effect of lumbar spine components on the mechanical behavior of spine. This approach allows for an understanding of which structures carry loads under specific loading conditions and provides foresights into which components should be included in the model to enhance its convergence with experimental data. Model 1 consisted of the L1-L5 spine, which included cortical and trabecular components of the bone, intervertebral discs comprising the annulus fibrosus, nucleus pulposus, and end plates, as well as facet joints that were modeled as single bodies each (Figure 2(a)). In contrast to the first model, the facets of Model 2 were designed as two thin plates formed on the surfaces of two opposing bones that constitute the joint, rather than as a single body (Figure 2(b)). In this model, the distance between the opposing facet pairs was approximately 0.5 mm. Also, ligaments were added to Model 2. Six types of ligaments were added to the spine here including, anterior longitudinal ligament (ALL), supraspinous ligament (SSL), posterior longitudinal ligament (PLL), ligamentum flavum (LF), interspinous ligament (ISL), and capsular ligament (CL). These ligaments can be seen on Figure 2(c).

2.2 FE analysis

In this study, all FE analyses were conducted using the Ansys Workbench (Ansys Inc., US) software. In this section, detailed information about the settings used in the analysis will be provided.

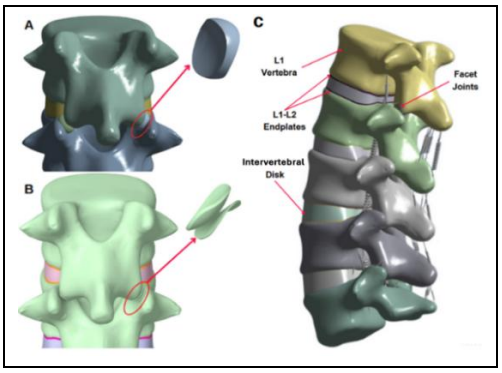


Figure 2(a): Facet joint in Model 1. (b): Facet joint in Model 2. (c): L1-L5 spine with ligaments in Model 2.

Boundary and loading conditions are important in FE analysis. To apply them correctly, a coordinate system was defined first at top surface of the L1 vertebra as shown in Figure 3. In this coordinate system, the Z axis was gone through the instantaneous center of motion of the lumbar spine. With this way, the physiological loading conditions of the lumbar spine may be acquired. The bottom surface of the L5 vertebra was fixed to restrict its motion to six degrees of freedom (Figure 3). In the present study, the lumbar spine models were separately subjected to flexion, extension, right lateral bending, and left lateral bending loads through the upper surface of the L1 vertebra. To simulate the flexion and extension loading scenarios, +4 Nm and -4 Nm moments were applied along Y axis, respectively. Similarly, +4 Nm and -4 Nm moments were applied along X axis to simulate the right lateral bending and left lateral bending, respectively. These load values were taken from the literature [21].

The meshing of the model is another crucial part in the FE analysis because different mesh models may have totally different results. To increase the accuracy of the numerical results, the second-order tetrahedral, hexahedral, and pentahedral elements were used to create the mesh model in the present study. The mesh model of the vertebral bodies, discs, and facets predominantly comprised of the hexahedral elements, while the other two types of elements were used as necessary (Figure 4). In this study, Model 1 had 460539 nodes and 134806 elements whereas Model 2 used 487093 nodes and 142966 elements.

Another important aspect of FE analysis is the assignment of appropriate material models to the structures being analyzed. There are many different studies in literature for this purpose. In this study, a homogeneous, linear elastic, and isotropic material model was used for the cortical and trabecular bones, nucleus pulposus, end plates, and facets. For the annulus fibrosus, an isotropic Mooney-Rivlin material model was used. All the material models are presented in Table 1 with their references. The ligaments were modeled as linear spring elements that only carry tensile forces. The spring constants are also provided in Table 1.

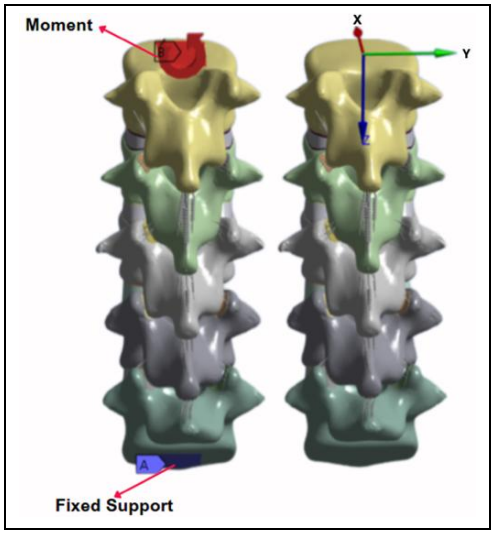


Figure 3. Boundary and loading conditions, the figure in left shows left lateral bending as an example.

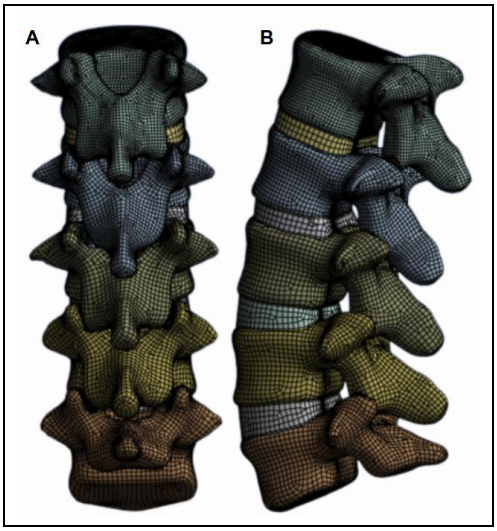


Figure 4. The mesh model of the L1-L5 spine from. (a): Posterior view and (b): Lateral view.

Table 1. Materials properties of the structures.

Structures	Young's Modulus (MPa)	Poisson's ratio	Element Type	References
Cortical Bone	12000	0.3	Hexahedral	[22]
Trabecular Bone	100	0.3	Hexahedral	[22]
Annulus Fibrosus	Mooney Rivlin: C_1=0.13, C_2=0.03, D=0.6		Hexahedral	[23]
Nucleus Pulposus	1	0.499	Hexahedral	[24]
Endplate	24	0.4	Hexahedral	[22]
Facet	11	0.499	Hexahedral	-
ALL Ligament	7.8	0.3	Springs	[22],[25]
PLL Ligament	10	0.3	Springs	[22],[25]
SSL Ligament	8	0.3	Springs	[22],[25]
ISL Ligament	10	0.3	Springs	[22],[25]
CL Ligament	7.5	0.3	Springs	[22],[25]
LF Ligament	15	0.3	Springs	[22],[25]

Modeling contacts between structures correctly is critical for obtaining accurate analysis results. In all models of this study, a "bonded" connection type was used between cortical bone and trabecular bone, between endplate and cortical bone, between endplate and disc structures, between annulus fibrosus and nucleus pulposus, and between facets and cortical bone. Additionally, in Models 2, a frictional contact definition with a static friction coefficient of 0.1 was assigned between the opposing facet pairs.

2.3 Validation of the FE model

In their experimental study [21], Guan et al. have investigated the mechanical response of the L1-S1 vertebrae under flexion/extension and left/right lateral bending loads.

They have applied moments up to 4 Nm and report the Range of Motions (ROM) of each spinal segment in degrees (°). In the present study, 4 Nm moment was applied to models. The ROM values obtained from each spinal unit were compared to ROM values of Guan and colleagues to validate the results of the present study. For a specific spinal segment, if the ROM of the present study was in between the maximum and minimum values of ROM of their study, it is assumed that the segment was validated.

3 Results and discussion

The primary aim of this study is to investigate the mechanical behavior of a lumbar spine model under physiological loading conditions using the FE method, and to validate the model with experimental data available in the literature. A validated spine model in this manner can be used in future studies. For example, with a validated FE model, a foresight can be obtained about the mechanical behaviors of different spinal instrumentation techniques in future numerical studies. Another aim of this study is to examine the mechanical behavior of different spine models and thus determine which structure in the spine functions under which loading conditions. With this method, it is possible to have an idea about which structures are important in approximating the real spine mechanical behavior. This is very important for the researchers who want to study the mechanical behavior of the lumbar spine with FE analysis to understand the key points of the subject and in this way, this study is intended to be a guide for them.

Here, it would be more beneficial to compare each model with the reference data from Guan et al. [21]. When the results of Model 1 examined carefully, Figure 5 shows that all segments, except L1-L2 in extension and left lateral bending and L4-L5 in extension, were not in the reference ranges of the Guan et al [21]. This showed that these segments were not validated under the applied loading conditions. These unvalidated segments showed less angular movement under applied conditions compared to the reference data of the Guan et al [21]. This means that these segments exhibit higher stiffness in the specified directions of movement compared to the reference. This also indicates that the lumbar spine behaves stiffer than lumbar spines examined in Guan et al [21]. The reason for this stiffer behavior exhibited by each segment and consequently the lumbar spine is attributed to the facet joints being modeled as a single body in Model 1. Although facet joints restrict the movement of the spine, they allow a certain amount of frictional movement. However, modeling the facet joints as a single body in Model 1 means that such frictional movement cannot be simulated for Model 1.

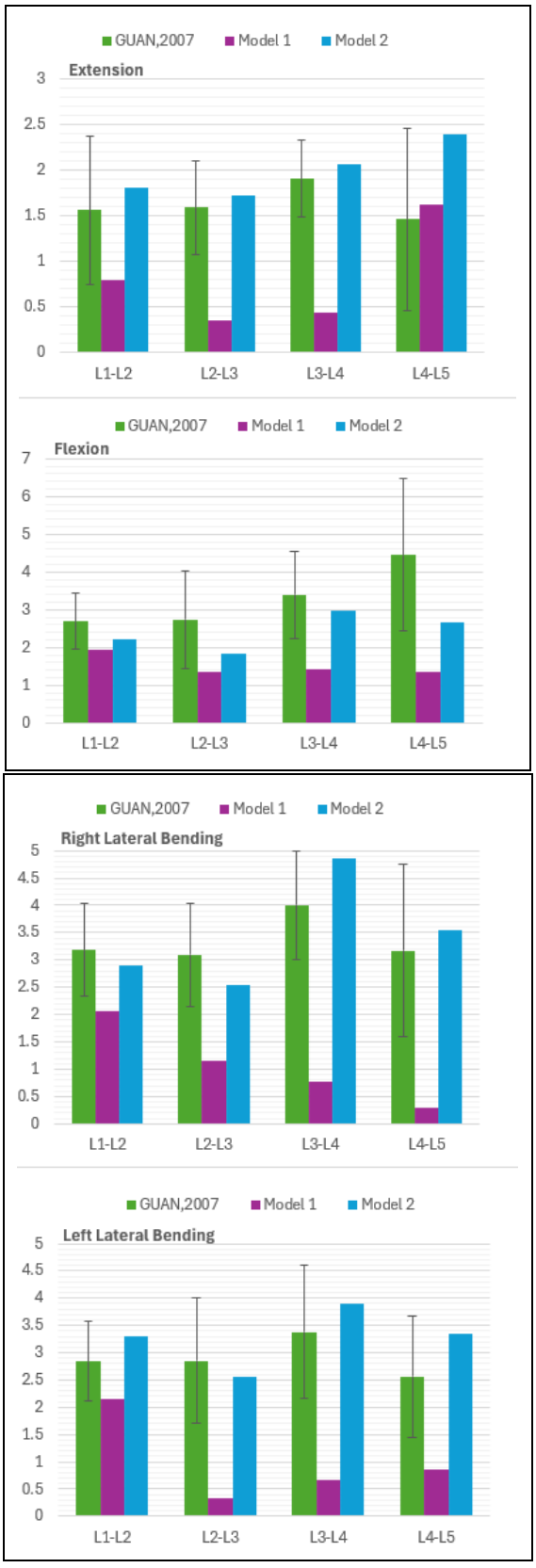


Figure 5. The ROM (degree) values obtained from the analyses and the results of Guan et al [21]. The reference results of the Guan et al [21] were given with average values and standard deviations.

As mentioned in the previous paragraph, modeling the facet joints as a single body restricts spinal movement. To converge the results with the experimental data of Guan et al [21], the lumbar spine needs to become more flexible. Before discussing the results of Model 2, strictly speaking, another model was tried in which facets were modeled as two facet pairs on the opposing bones. However, because of the excessive movement, no results could be achieved. As a result, Model 2 is the ligament added version of this model with no results.

As can be seen in Figure 5, in the second model, the ROMs of each vertebral segment were in the range from the reference study [21]. Here, it can be said that the results of Model 2 were validated for each spinal level in every loading condition. As a result, in the case of creating paired facets and adding the ligaments like in Model 2 resulted in a converged mechanical behavior to that of the real spine just in the study of Guan et al [21].

When comparing Model 1, Model 2 and the other model which is the version of Model 2 without the ligaments, the results clearly showed that modeling the facets as a single body caused excessive stiffness, while modeling them as facet pairs at opposing bones caused excessive movement. In the first case, the results did not converge with the experimental data [21], while in the second case, no results could be obtained from the analyses due to excessive movement. Using the paired facets may solve the excessive stiffness by giving the spine extra movement. Moreover, adding the ligaments may overcome the problem of excessive movement by providing it sufficient stiffness. Consequently, Model 2, which has paired facet joints and ligaments provided converged ROM values in each L1-L5 spinal segment under flexion/extension and left/right lateral bending moments. This validated FE model may be used in future studies.

4 Conclusions

This numerical study presents a validated FE model of the L1-L5 lumbar spine. This model may be used in future studies. According to the results, modeling the facets as a single body caused excessive stiffness, while modeling them as facet pairs at opposing bones caused excessive movement. Using the paired facets may solve the excessive stiffness by giving the spine extra movement. Moreover, adding the ligaments may overcome the problem of excessive movement by providing it sufficient stiffness. It can be said that using a model which, has paired facet joints and ligaments, provided converged ROM values in each L1-L5 spinal segment under flexion/extension and left/right lateral bending moments.

5 Acknowledgement

We would like to acknowledge TÜBİTAK for supporting this work within the scope of 2209-A - Research Project Support Programme for Undergraduate Students. Project No: 1919B012300933. We also would like to acknowledge Emre Şengül for sharing the STL model of the spine.

6 Author contribution statements

In the study carried out, Berna Seval Doğan contributed to the review of literature, 3D designs, performing analysis, examination of the results, writing and critical review; Mustafa Özkaya contributed to the idea formation, review of literature, examination of the results, writing and critical review, spellcheck and checking the contents of the article.

7 Ethics committee approval and conflict of interest statement

"For the present study, there is no need for ethics committee approval".

"For the present study, there is no conflict of interest with any person/institution".

8 References

[1] Şengül E. Posterior Stabilizasyon Yapılmış Lomber Omurga İçin Özgün Bir Sonlu Elemanlar Modelinin Geliştirilmesi ve Stabilizasyon Sonrası Biyomekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2021.

[2] Calek AK, Cornaz F, Suter M, Fasser MR, Baumgartner S, Sager P, Farshad M, Widmer J. "Load distribution on intervertebral cages with and without posterior instrumentation". *The Spine Journal*, 24(5), 889-898, 2024.

[3] Hsieh YY, Kuo YJ, Chen CH, Wu LC, Chiang CJ, Lin CL. "Biomechanical Assessment of Vertebroplasty Combined with Cement-Augmented Screw Fixation for Lumbar Burst Fractures: A Finite Element Analysis". *Applied Sciences*, 10(6), 2133, 2020.

[4] La Barbera L, Wilke HJ, Ruspi ML, Palanca M, Liebsch C, Luca A, Brayda-Bruno M, Galbusera F, Cristofolini L. "Load-sharing biomechanics of lumbar fixation and fusion with pedicle subtraction osteotomy". *Scientific Reports*, 11, 3595, 2021.

[5] Zhang F, Liu J, He X, Wang R, Lu T, Zhang T, Liu Z. "Preclinical Evaluation of a Novel 3D-Printed Movable Lumbar Vertebral Complex for Replacement: In Vivo and Biomechanical Evaluation of Goat Model". *BioMed Research International*, 2021(1), 2343404.

[6] Lai O, Chen Y, Chen Q, Hu Y, Ma W. "Cadaveric biomechanical analysis of multilevel lateral lumbar interbody fusion with and without supplemental instrumentation". *BMC Musculoskeletal Disorders*, 22(1),280, 2021.

[7] Widmer J, Cornaz F, Scheibler G, Spirig JM, Snedeker JG, Farshad M. "Biomechanical contribution of spinal structures to stability of the lumbar spine-novel biomechanical insights". *The Spine Journal*, 20(10), 1705-1716, 2020.

[8] Tsutsui S, Yamamoto E, Kozaki T, Murata A, Yamada H. "Biomechanical study of rod stress in lumbopelvic fixation with lateral interbody fusion: an in vitro experimental study using synthetic bone models". *Journal of Neurosurgery: Spine*, 37(1), 73-79, 2022.

[9] Umale S, Yoganandan N, Baisden JL, Choi H, Kurpad SN. "A biomechanical investigation of lumbar interbody fusion techniques". *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 125, 104961, 2022.

[10] Guo HZ, Tang YC, Guo DQ, Luo PJ, Li YX, Mo GY, Ma YH, Peng JC, Liang D, Zhang SC. "Stability evaluation of oblique lumbar interbody fusion constructs with various fixation options: a finite element analysis based on three-dimensional scanning models". *World Neurosurgery*, 138, 530-538, 2020.

[11] Fang G, Lin Y, Wu J, Cui W, Zhang S, Guo L, Sang H, Huang W. "Biomechanical comparison of stand-alone and bilateral pedicle screw fixation for oblique lumbar interbody fusion surgery-a finite element analysis". *World Neurosurgery*, 141, 204-212, 2020.

[12] Sengul E, Ozmen R, Yaman ME, Demir T. "Influence of posterior pedicle screw fixation at L4–L5 level on biomechanics of the lumbar spine with and without fusion: a finite element method". *BioMed Eng OnLine*, 20(98), 2021.

[13] McDonald K, Little J, Pearcy M, Adam C. "Development of a multi-scale finite element model of the osteoporotic lumbar vertebral body for the investigation of apparent level vertebra mechanics and micro-level trabecular mechanics". *Medical Engineering & Physics*, 32(6), 653-661, 2010.

[14] Kim YH, Wu M, Kim K. "Stress analysis of osteoporotic lumbar vertebra using finite element model with microscaled beam-shell trabecular-cortical structure". *Journal of Applied Mathematics*, 2013(1), 285165, 2013.

[15] Ardatov O, Maknickas A, Alekna V, Tamulaitienė M, Kačianauskas R. "The finite element analysis of osteoporotic lumbar vertebral body by influence of trabecular bone apparent density and thickness of cortical shell". *Acta Mechanica et Automatica*, 11(4), 285-292, 2017.

[16] Ritzel H, Amling M, Pösl M, Hahn M, Delling G. "The thickness of human vertebral cortical bone and its changes in aging and osteoporosis: A histomorphometric analysis of the complete spinal column from thirty-seven autopsy specimens". *Journal of Bone and Mineral Research*, 12(1), 89-95, 2017.

[17] Yang B, Lu Y, Um C, O'Connell GD. "Relative Nucleus Pulposus Area and Position Alter Disk Joint Mechanics". ASME. *Journal of Biomechanical Engineering*, 141(5), 051004, 2019.

[18] O'Connell GD, Vresilovic EJ, Elliott DM. "Comparison of animals used in disc research to human lumbar disc geometry". *Spine*, 32(3), 328–333, 2007.

[19] Showalter BL, Beckstein JC, Martin JT, Beattie EE, Orías AAE, Schaer TP, Vresilovic EJ, Elliott DM. "Comparison of animal discs used in disc research to human lumbar disc: torsion mechanics and collagen content." *Spine*, 37(15), 900–907, 2012.

[20] Shirazi-Adl A, Ahmed A, Shrivastava S. "A finite element study of a lumbar motion segment subjected to pure sagittal plane moments." *Journal of Biomechanics*, 19(4), 331–350, 1986.

[21] Guan Y, Yoganandan N, Moore J, Pintar FA, Zhang J, Maiman DJ, Laud P. "Moment-rotation responses of the human lumbosacral spinal column". *Journal of Biomechanics*, 40(9), 1975-1980, 2007.

[22] Kurutz M. *Finite element modelling of human lumbar spine*. Editor: Moratal D, Finite Element Analysis, 209-236, London, UK, IntechOpen Limited, 2010.

[23] Wang K, Deng Z, Wang H, Li Z, Zhan H, Niu W. "Influence of variations in stiffness of cervical ligaments on C5-C6 segment". *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 72, 129-137, 2017.

[24] Galbusera F, Bellini CM, Raimondi MT, Fornari M, Assietti R. "Cervical spine biomechanics following implantation of a disc prosthesis". *Medical Engineering & Physics*, 30(9), 1127-1133, 2008.

[25] Erbulut D, Zafarparandeh I, Hassan C, Lazoglu I, and Ozer A. "Determination of the biomechanical effect of an interspinous process device on implanted and adjacent lumbar spinal segments using a hybrid testing protocol: a finite-element study". *Journal of Neurosurgery*, 23(2), 1-9, 2015.

Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 31(7), 1170-1191, 2025

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

A novel solution approach for optimization of swarm UAV formation control problem under uncertain and dynamic constraints: Crazyfly 2.0 application

Belirsiz ve dinamik kısıtlar altında sürü İHA formasyon kontrol probleminin optimizasyonu için yeni bir çözüm yaklaşımı: Crazyfly 2.0 uygulaması

Ukbe Üsame Uçar[1*], *Burak Tanyeri*[1]

[1]Department of Aircraft Maintenance and Repair, School of Civil Aviation, Fırat University, Elazığ, Türkiye.
uuucar@firat.edu.tr, ukbeusameucar@gmail.com, btanyeri@firat.edu.tr

Received/Geliş Tarihi: 12.08.2024 Revision/Düzeltme Tarihi: 29.01.2025 doi: 10.5505/pajes.2025.09552
Accepted/Kabul Tarihi: 24.03.2025 Research Article/Araştırma Makalesi

Abstract

In this article, Swarm UAV Formation Control Problem which is Homogeneous, Time-Window, Central Control Architecture, Uncertain, Dynamic Structure, and Leaderless (HTUDL-S-UAV) are obtained. For the solution of the problem, a new solution algorithm with generic and dynamic properties based on the annealing simulation algorithm is developed. The formation control architecture is determined as 5 layers and a new geometric approach to unit circle systematics has been developed to create formations. Tra-Coll and CCA algorithms are proposed in literature for tracking the trajectories of UAVs and preventing collisions. The application study is carried out on 9 different formations (Triangle, Square, Pentagon, V Shape, Crescent, Star, Rhombus Formation with 4 and 8, Line) and 7 different missions (Swarm Navigation Mission, Formation-Switching Mission, The mission to Remove UAV from the Swarm, The mission of adding UAV to the Swarm, Swarm Rotation Mission, Swarm Division/Unification Mission, Trajectory Tracking Mission as a Swarm) using Crazfly 2.0 drones in a ROS simulation program and on the real system. The proposed solution approach carried out all of these tasks in line with the specific conditions of the mission and achieved 3rd place in the Teknofest-2021 Swarm UAV Competition in Turkey. Furthermore, thanks to the study, it is aimed to create a decision support system for the optimal success of strategic and critically important Swarm UAV missions and other fleet autonomous systems.

Keywords: UAV swarm formation control problem, Metaheuristic algorithm, Formation tracking and obstacle avoidance networks, Geometric system architecture.

Öz

Bu makalede, Homojen, Zaman Pencereli, Merkezi Kontrol Mimarili, Belirsiz, Dinamik Yapılı ve Lidersiz (HTUDL-S-İHA) Sürü İHA Formasyon Kontrol Problemi elde edilmiştir. Problemin çözümü için tavlama benzetim algoritmasına dayalı jenerik ve dinamik özelliklere sahip yeni bir çözüm algoritması geliştirilmiştir. Formasyon kontrol mimarisi 5 katman olarak belirlenmiş ve formasyonların oluşturulması için birim çember sistematiğine yeni bir geometrik yaklaşım geliştirilmiştir. Literatürde İHA'ların yörüngelerinin takibi ve çarpışmaların önlenmesi için Tra-Coll ve CCA algoritmaları önerilmiştir. Uygulama çalışması 9 farklı formasyon (Üçgen, Kare, Beşgen, V Şekli, Hilal, Yıldız, 4'lü ve 8'li Eşkenar Dörtgen Formasyonu, Çizgi) ve 7 farklı görev (Sürü Navigasyon Görevi, Formasyon Değiştirme Görevi, İHA'yı Sürüden Çıkarma Görevi, İHA'yı Sürüye Ekleme Görevi, Sürü Rotasyon Görevi, Sürü Bölme/Birleştirme Görevi, Sürü Olarak Yörünge Takip Görevi) üzerinde Crazfly 2.0 İHA'ları kullanılarak ROS simülasyon programında ve gerçek sistem üzerinde gerçekleştirilmiştir. Önerilen çözüm yaklaşımı tüm bu görevleri, görevin kendine özgü koşulları doğrultusunda yerine getirmiş ve Teknofest-2021 Sürü İHA Yarışması'nda Türkiye 3.lüğü elde etmiştir. Ayrıca çalışma sayesinde stratejik ve kritik öneme sahip Sürü İHA görevlerinin ve diğer filo otonom sistemlerinin optimum başarısı için bir karar destek sistemi oluşturulması hedeflenmektedir.

Anahtar kelimeler: İHA sürü formasyonu kontrol problemi, Metasezgisel algoritma, formasyon takibi ve engelden kaçınma ağları, Geometrik sistem mimarisi.

1 Introduction

UAVs are autonomous systems that can be controlled remotely and can fly without the use of a pilot. These systems are less affected by geographical and meteorological conditions and become an effective means of transportation in cases of heavy traffic. By increasing their payload capacities, developing imaging systems, and improving power units, UAVs can move comfortably at long ranges and high altitudes. Due to these functional structures, the usage area of UAVs is expanding and they are used in swarms to fulfill their missions more effectively, quickly, flexibly, and reliably. Reconnaissance and surveillance, monitoring of traffic density, logistics, military operations, agriculture, and natural disasters such as fire and earthquake are the areas where Swarm UAVs are used intensively. One of the most important points in the use of UAV swarm is formation control. [1]. There is a need for an accurate formation control algorithm that includes many parameters and constraints to perform the tasks in a simultaneous and collaborative structure. The charge status of UAVs, the communication range of each, and avoidance of collision with each other are some of these constraints. In addition, in cases where a UAV disappears from the system or a new UAV is added to the system, the formation is not disrupted and the formation control algorithm responds quickly to changing situations are other constraints affecting the system. In recent years, researchers have been making an intense effort on the formation control of UAV Swarm [2]-[9].

Swarm UAVs are generally divided into two groups homogeneous and heterogeneous. While all UAVs have the same characteristics in homogeneous swarms, UAVs in heterogeneous swarms may differ due to their payload

*Corresponding author/Yazışılan Yazar

capacity, automation levels, and platform configurations. In terms of control architecture, Swarm UAVs are divided into two centralized [10],[11] and decentralized [12] control architectures. In the central control architecture, UAVs do not communicate with each other, UAV information is collected in a center and UAVs are configured from this center. In the decentralized control architecture, UAVs communicate with each other and make the necessary decisions. Swarm UAVs are divided into three terms Static, Dynamic, and Hybrid. In a static swarm, the number of UAVs in the system is fixed and UAV tasks are predetermined. In these swarms, the number of UAVs in the system does not change and a new UAV cannot be included in the system. In dynamic swarms, a new UAV may be added to the system at any time or may leave the system. In the hybrid herd, there is a static swarm in the center and new individuals can be included in the system or leave the system in line with the permission of this static swarm [13].

In recent years, many methodologies related to formation control algorithms have been presented by researchers. Leader-follower-based strategy is generally used in these studies. In this strategy, a leader is generally determined in the swarm, and the formation is formed over this leader [1]. This strategy is used intensively by scientists because it facilitates application and analysis studies [14]-[28]. In real-life applications such as military operations and fires, leader-follower swarm strategies are insufficient due to not meeting the dynamic requirements. For this reason, researchers spend intense efforts on leaderless swarm strategies. Apart from the leader-follower, there are "Virtual Structure [29]-[31]", "Behavior-Based [32]", "Artificial Potential Field [33]", "Hierarchical Method [34],[35]", "Consensus-Based [36]-[39]" and "Intelligent Control Approaches [40]-[44]" strategies as formation control mechanisms [45].

Many methods have been developed for Swarm UAV Formation Control Algorithms in the literature. Wu et al. obtained swarm formation control problem-based leader-follower and use the theory of consistency for solving the problem [46]. Dong et al. examined the swarm formation control problem where the speeds of UAVs are different from each other and formations change over time. They proposed a Formation Protocol Design considering time-varying the solution to the problem [47]. Liang et al. discussed the formation control problem-based leader-follower for the UAVs with fixed wings and considered limited movement and unknown distribution in the problem. Liang et al. discussed the formation control problem based on leader-follower for the UAVs with fixed wings and considered limited movement and unknown distribution in the problem [48]. Guo et al. focused on the relative position and formation control of the UAV swarms [49]. Fu et al. dealt with the swarm formation control and reconstruction problem for obstacle and unobstacle situations. In this study, they developed the collision estimate mechanism to avoid obstacles [50]. Yu et al. addressed the formation control problem in which swarm structure changes over time and carried out both numerical and experimental studies in the application section [51]. Speck and Bucci tackled the formation control problem that is decentralized for the UAV swarms which are fixed wings and proposed a new solution approach with multi-objective based on reinforcement learning formulation [52]. Zhu et al. handled the formation control problem with a leader-follower strategy for heterogeneous UAV swarm and concentrated on the display and verification system in this study [53]. Ali et al. developed a solution approach based on the Particle Swarm Optimization Algorithm for the swarm formation control problem consisting of 10 UAVs and used a leader-follower-based strategy [54]. Yang et al. conducted survey research on metaheuristic algorithms using swarm intelligence considering the studies done in literature in recent years [55].

Fu et al. developed a virtual leader-based control algorithm considering the "V" type and line type formations and made a simulation study [56]. Wu et al. proposed a consensus algorithm for formation control and used the Particle Swarm Optimization algorithm to avoid the obstacle [57]. Wang et al. examined the formation control problem in terms of discrete and continuous times [58]. Li and Fang focused on the static and dynamic obstacle avoidance problems of the swarm and realized simulation study for “V”, “W” and “X” formations [59]. Liu et al. obtained a formation control problem with limited time regarding anti-collision and enter saturation [60]. Shen et al. concentrated on reducing computation and communication difficulties when the number of UAVs in the formation increased [61]. Chen and Duan designed a two-layer solution architecture for the formation control problem of UAVs with fixed-wing [62]. Shen and Wei generated a control algorithm based on the behaviors of birds for the swarm control problem and realized a simulation study in Matlab [63]. An et al. used AESO and TV-BLF methods for swarm quadrotor formation control problems in terms of leader-follower and time-varying [64]. The solution methodology with two layers for the UAVs formation control problem was produced by Shao et al. This method, which has multiple leaders and followers, has been tested in simulation studies [65].

In addition to these articles, the articles published in 2024 were analyzed and summarized as follows. In general, the papers addressed issues related to the control of autonomous systems such as multi-agent systems, unmanned aerial vehicles (UAVs) and surface vehicles (SAVs). The main problems have been found to be the safe and stable management of heterogeneous and nonlinear systems, communication delays, tracking error constraints and coordination challenges. In particular, solutions have been developed to improve the performance of autonomous systems, focusing on specific application areas such as fixed-wing drones and UAV-ASV systems. Another focus of the studies is the safe and efficient implementation of control methods with low computational cost. Advanced control techniques such as local control barrier functions (CBFs), Lyapunov-based methods and leader-follower control laws have been used to solve these problems. In addition, fuzzy logic systems (FLS), virtual leaders and adaptive control approaches are also frequently used. The results obtained show that the proposed methods are validated through theoretical analysis and simulations and significantly improve the system performance. These studies, supported by simulations and experiments, have made significant contributions to making autonomous systems more reliable and effective [84]-[107].

In this study, Swarm UAV Formation Control Problems with Homogeneous, Time-Window, Central Control Architecture, Uncertain, Dynamic Structure, and Leaderless (HTUDL-S-UAV) are discussed and a new solution approach based on Annealing Simulation Algorithm has been developed to solve the problem. In the problem, 9 different formations and 7 different missions were defined and the effectiveness of the algorithm was tested on these tasks. In the testing phase, the algorithm was first implemented on Crazyfly 2.0 virtual drones on the ROS Simulation Program. In the next step, the algorithm performed the specified tasks on real Crazyfly 2.0 drones. This article is the

first in literature, as far as is known, due to the proposed problem and the developed solution architecture. The contributions of the article to the literature are expressed in the following items.

- There is no study in literature in which the "Simulation Annealing Algorithm" is used in Swarm UAV Formation Control Architecture,
- It is the first study in literature to consider 9 different formations and 7 different tasks together. The developed method differs from other solution methodologies in literature as it provides solutions to all of these mission combinations,
- It is envisaged that the separation of the swarm into different formations and the merging of two swarms from different formations into a third different formation have been studied for the first time in literature to the best of our knowledge,
- A new geometric solution approach based on the unit circle and center of gravity is proposed in the formation-creating architecture,
- The new heuristic algorithms for trajectory tracking and collision avoidance are proposed.

The rest of the article is arranged as follows. In Chapter 2, the problem is defined and the variables related to the problem are expressed. The solution architecture developed in Chapter 3 is presented. In Chapter 4, simulation and experimental applications are made. In addition, the application results are analyzed in this section. In Chapter 5, the article is summarized; general evaluations and suggestions for future studies are made.

2 Preliminaries and problem statement

2.1 Theory of the UAV swarm formation control problem

UAV Swarm Formation Control Problems is a multi-disciplinary problem that has been studied intensively in recent years and can be addressed from different perspectives

A swarm system with "n" elements has a weighted directed and undirected graph "$G = (W, E, A)$" structure formed by nodes set "$W = \{1,2, \dots, n\}$", set of edge "$E \subseteq \{(i,j) : i,j \in W\}$" and a weighted adjacency matrix $A = [a_{i,j}]_{N\times N}$ [1], [22]. In the graph, each UAV is expressed with the index "i=j" and the UAV cluster is represented by $N = \{1, \dots, i = j, \dots, n\}$.

$$A = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} & \cdots & a_{1,n-2} & a_{1,n-1} & a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} & & a_{2,n-2} & a_{2,n-1} & a_{2,n} \\ \vdots & & & \ddots & & \vdots & \\ a_{i,1} & a_{i,2} & a_{i,3} & & a_{i,n-2} & a_{i,n-1} & a_{i,n} \\ a_{n,1} & a_{n,2} & a_{n,3} & \cdots & a_{n,n-2} & a_{n,n-1} & a_{n,n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

In Equation 1, A Matrix defines whether there is a connection between nodes "i" and"j". If there is a path between nodes"i" and"j"; "$a_{i,j} = 1$", otherwise; "$a_{i,j} = 0$". Furthermore, it is "$a_{i,i} = 0$" in the matrix [1,22].

Finally, let's define the Laplacian Matrix $\left(L \in R^{N\times N} \text{ and } L = [l_{i,j}]_{N\times N}\right)$ which has an important place in describing the neighborhood relations of a graph. The following assumptions are made regarding the Laplacian Theorem in the Swarm Formation Control Problem on an undirected graph [1],[66].

i. The matrix L has at least one zero eigenvalue element and 1 is the corresponding eigenvector. Accordingly, $L1 = 0$,

ii. If graph G consists of an architecture with a spanning tree, then a simple eigenvalue of the matrix L is zero, and all of the other eigenvalues which are N-1 are made up of positive real sections.

2.2 HTUDL-S-UAV problem

UAV Swarm Formation Control Problems is a multi-disciplinary problem that has been studied intensively in recent years and can be addressed from different perspectives according to application areas. Military operations [67]-[69], surveillance and reconnaissance activities [70]-[71], agriculture [72],[73], logistics [74],[75], and forest fires [76],[77] are some of the areas where the problem is applied. Since there is more than one UAV in the problem, they have moved autonomously, the ideal formation geometry is revealed and the formation control algorithm is developed, communication between the swarm and the central computer requires the collaboration of many science fields (geometry, mathematical, industrial engineering, computer engineering, automotive engineering, electronic engineering) and takes on a multi-disciplinary structure. The HTUDL-S-UAV problem addressed in this article has the following characteristics.

- All UAVs in the swarm have the same characteristics,
- Formation tasks must be completed within a certain time window and an unfulfilled task is considered unsuccessful. In addition, each UAV can stay in the air for a certain period due to its battery charge state. As the state of charge decreases, the stabilization of the UAV decreases and the UAV leaves its orbit. In this case, the UAV is damaged by hitting obstacles or other UAVs and causing the formation to deteriorate. For these reasons, UAVs must perform their duties within the specified time intervals,
- UAV information is monitored instantly on the central computer and all formation tasks are carried out on this computer. Commands are sent to UAVs by this computer. For this reason, the problem has central control architecture,
- There are different formation tasks in the problem and the transitions between these formations are determined randomly. Each formation mission has a different geometric structure, and therefore the number of UAVs varies in each mission. For this reason, the problem has a dynamic structure,
- In some formation missions, any UAV can be removed from the system at any "t" moment while the swarm is in the air. In this way, if any UAV leaves the swarm, it is tried to understand whether its formation is disrupted and the reaction of the algorithm. The problem has an uncertain structure because it is not clear when which UAV will be removed from the system and the order of formation missions is not clear,
- Due to the uncertain and dynamic nature of the problem, non-leader-based solution architecture is being developed. In this way, it is aimed to perform the formation task without dispersion in case of loss of UAV due to signal failure and charging status.

The problem stated in this article is proposed based on the TEKNOFEST-2021 Swarm UAV Competition. In the problem, there are 9 different formations (triangle, square, pentagon, v,

crescent, star, equilateral quadrangle with 4 UAV and 8 UAV, line) and 7 different missions (navigation as a swarm, formation transformation, adding and removing individuals from a swarm, swarm rotation, swarm division, and merging swarm trajectory tracking) to which these formations can be applied.

In the problem, UAVs start to move from different coordinate points and these points are determined randomly. In this case, generic solution geometry must be created for each formation. To overcome this problem in the article, a solution architecture based on coordinate-independent and analytical circle geometry is developed. This solution architecture is thought to be used for the first time in literature. Information on the formations considered in the article and suggested generic solution geometries are given below.

2.3 Geometric solution approach

In the Geometric Solution Approach, a center of gravity is formed in the direction of “x” and “y” coordinates for UAVs at different starting points. This center is considered as the origin point. A radius r is generated according to the distance between the two UAVs in the formation and the geometric shape of the formation. Depending on this radius, a circle is created and UAVs are placed on this circle according to the origin coordinates and radius length. As a result, shapes of pentagonal, triangular or other formation types are generated with a distance between them equal to the distance between the two UAVs. At the same time, the “x” and “y” coordinates of each UAV in the formation can be calculated with this formulation. The most important innovation here, unlike other studies in literature, is the creation of a center of gravity for the UAVs and the generation of the reference point of all UAVs with generic equations according to the radius “r” depending on the circle developed. In literature, vector-based approaches are generally used, which are time-consuming and computationally expensive. With the method proposed here, reference points can be determined in a faster and more practical way. Formation types and proposed geometric formulations are described in the following sections.

2.3.1 Triangle formation

In the triangle formation, it is desired that the UAVs, which are at random positions on the ground, change into a triangle form with an "x" distance between them within the "t" period. This "t" time and "x" distance can take different values depending on the type of task. The proposed solution geometry for the triangle formation is shown in Figure 1 and Equation 2.

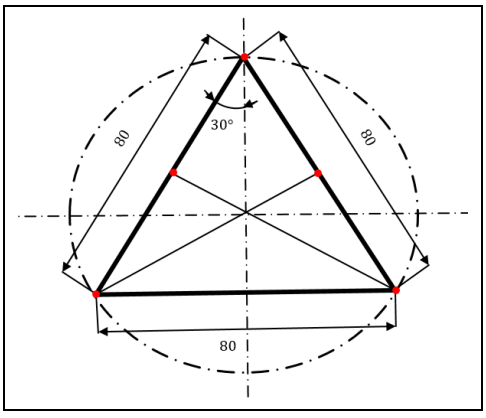


Figure 1. Triangle solution geometry.

a	=	***distance between two UAVs***
x_i	=	*initial x coordinate of "i. UAV"*
$\bar{x}$	=	$\frac{\sum x_i}{3}$
y_i	=	*initial y coordinate of "i. UAV"*
$\bar{y}$	=	$\frac{\sum y_i}{3}$
R	=	*formation circle radius*
R	=	$\frac{2 * \sqrt{a^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2}}{3}$
x_1	=	$\bar{x} - R * \cos 30$
y_1	=	$\bar{y} - R * \sin 30$
x_2	=	$\bar{x}$
y_2	=	$\bar{y} + R$
x_3	=	$\bar{x} + R * \cos 30$
y_3	=	$\bar{y} - R * \sin 30$

(2)

2.3.2 Square formation

In the square formation, 4 drones randomly positioned on the ground are expected to enter the formation at any "t" time, with an "x" unit distance between each of them. The "t" time and "x" distance here vary according to the problem type. The solution architecture developed for the square formation is shown in Figure 2 and Equation 3.

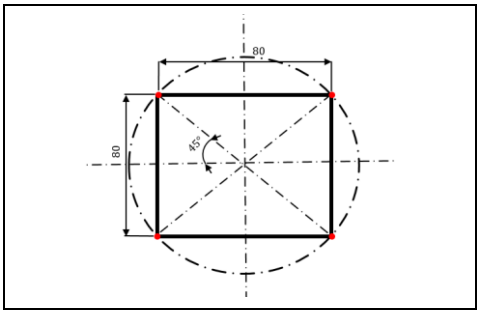


Figure 2. Square formation geometry.

a	=	***distance between two UAVs***
x_i	=	*initial x coordinate of "i. UAV"*
$\bar{x}$	=	$\frac{\sum x_i}{4}$
y_i	=	*initial y coordinate of "i. UAV"*
$\bar{y}$	=	$\frac{\sum y_i}{4}$
R	=	*formation circle radius*
R	=	$\sqrt{\frac{a^2}{2}}$
x_1	=	$\bar{x} - R * \cos 45$
y_1	=	$\bar{y} - R * \sin 45$
x_2	=	$\bar{x} - R * \cos 45$
y_2	=	$\bar{y} + R * \sin 45$
x_3	=	$\bar{x} + R * \cos 45$
y_3	=	$\bar{y} + R * \sin 45$
x_4	=	$\bar{x} + R * \cos 45$
y_4	=	$\bar{y} - R * \sin 45$

(3)

2.3.3 Pentagon formation

In the pentagonal formation, there are five drones randomly placed at different coordinates on the ground. In this formation, at any "t" moment determined by the competition jury, 5 drones are expected to enter the formation with an "x" distance between them. The solution mechanism based on the circle formulation suggested for the pentagonal formation is given in Figure 3 and Equation 4.

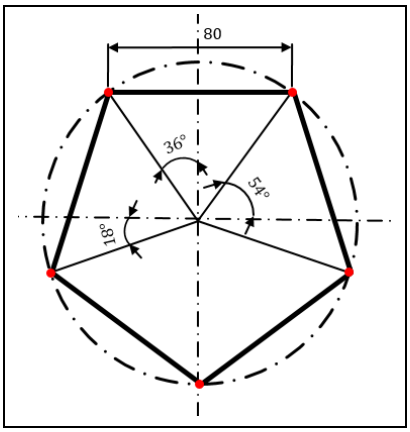


Figure 3. Pentagon formation geometry.

a	=	***distance between two UAVs***
x_i	=	*initial x coordinate of "i. UAV"*
$\bar{x}$	=	$\frac{\sum x_i}{5}$
y_i	=	*initial y coordinate of "i. UAV"*
$\bar{y}$	=	$\frac{\sum y_i}{5}$
R	=	*formation circle radius*
R	=	$\left(\frac{\sqrt{50+10\sqrt{5}}}{10}\right) * a$
x_1	=	$\bar{x}$
y_1	=	$\bar{y} - R$
x_2	=	$\bar{x} - R * \cos 18$
y_2	=	$\bar{y} - R * \sin 18$
x_3	=	$\bar{x} - R * \cos 54$
y_3	=	$\bar{y} + R * \sin 54$
x_4	=	$\bar{x} + R * \cos 54$
y_4	=	$\bar{y} + R * \sin 54$
x_5	=	$\bar{x} + R * \cos 18$
y_5	=	$\bar{y} - R * \sin 18$

(4)

2.3.4 "V" Formation

In the V formation mission, 5 drones are randomly placed on the ground and then the drones are asked to line up in a "V" shape with an "x" distance between them at any "t" moment. The geometric solution steps for the V formation task are shown in Figure 4 and Equation 5.

a	=	***distance between two UAVs***
x_i	=	*initial x coordinate of "i. UAV"*
$\bar{x}$	=	$\frac{\sum x_i}{3}$
y_i	=	*initial y coordinate of "i. UAV"*
$\bar{y}$	=	$\frac{\sum y_i}{3}$
R	=	*formation circle radius*
R	=	$\frac{2 * \sqrt{a^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2}}{3}$
x_1	=	$\bar{x} - R * \cos 30$
y_1	=	$\bar{y} - R * \sin 30$
x_2	=	$\bar{x}$
y_2	=	$\bar{y} + R$
x_3	=	$\bar{x} + R * \cos 30$
y_3	=	$\bar{y} - R * \sin 30$

(5)

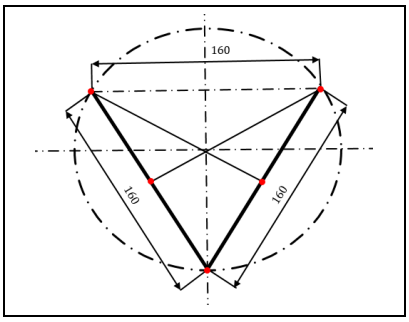


Figure 4. "V" formation geometry.

2.3.5 Crescent formation

The crescent formation consists of 6 drones located at different starting coordinates. In the formation, the time is determined instantly by the jury, the distance between each drone is "x" units and this "x" distance can vary. The proposed geometric approach for crescent formation is shown in Figure 5 and Equation 6.

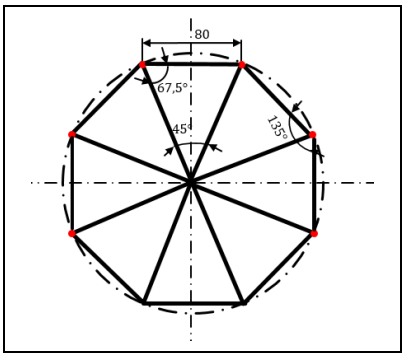


Figure 5. "Crescent" formation geometry.

a	=	***distance between two UAVs***
x_i	=	*initial x coordinate of "i. UAV"*
$\bar{x}$	=	$\frac{\sum x_i}{6}$
y_i	=	*initial y coordinate of "i. UAV"*
$\bar{y}$	=	$\frac{\sum y_i}{6}$
R	=	*formation circle radius*
R	=	$\sqrt{\frac{a^2}{2 * (1 - cos45)}}$
x_1	=	$(R * cos67.5°)$
y_1	=	$-(R * sin67.5°)$
x_2	=	$-(R * cos67.5°)$
y_2	=	$-(R * sin67.5°)$
x_3	=	$-(R * cos22.5°)$
y_3	=	$-(R * sin22.5°)$
x_4	=	$-(R * cos22.5°)$
y_4	=	$(R * sin22.5°)$
x_5	=	$-(R * cos67.5°)$
y_5	=	$(R * sin67.5°)$
x_6	=	$(R * cos67.5°)$
y_6	=	$(R * sin67.5°)$

(6)

2.3.6 Star formation

The star formation consists of 10 drones, and initially, the drones are randomly deployed on the ground. At a "t" moment determined by the jury, the drones take off from the ground and must move to star formation within "a" time. Information about the formation is shown in Figure 6 and Equation 7.

a	=	***distance between two UAVs***
x_i	=	*initial x coordinate of "i. UAV"*
$\bar{x}$	=	$\frac{\sum x_i}{10}$
y_i	=	*initial y coordinate of "i. UAV"*
$\bar{y}$	=	$\frac{\sum y_i}{10}$
R	=	*formation circle radius*
R	=	$\frac{\sqrt{25+10\sqrt{5}}}{10} * a$
b	=	*Distance from the center to the point at the ends of the star*
b	=	$r + \frac{\sqrt{3 * a^2}}{4}$
x_1	=	$\bar{x} - b * \cos 54°$
y_1	=	$\bar{y} - b * \sin 54°$
x_2	=	$\bar{x} - b * \cos 18°$
y_2	=	$b * \sin 18°$
x_3	=	$\bar{x}$
y_3	=	b
x_4	=	$\bar{x} + b * \cos 18°$
y_4	=	$b * \sin 18°$
x_5	=	$\bar{x} - b * \cos 54°$
y_5	=	$\bar{y} - b * \sin 54°$
x_6	=	$\bar{x}$
y_6	=	$-R$
x_7	=	$\bar{x} - r * \cos 18°$
y_7	=	$\bar{y} - r * \sin 18°$
x_8	=	$\bar{x} - r * \cos 54°$
y_8	=	$r * \sin 54°$
x_9	=	$(r * cos54°)$
y_9	=	$(r * sin54°)$
x_{10}	=	$(r * cos18°)$
y_{10}	=	$-(r * sin18°)$

(7)

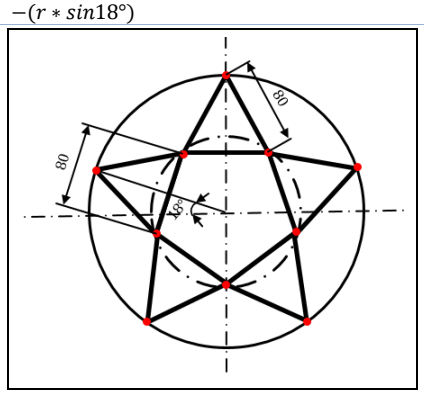


Figure 6. Star solution geometry.

2.3.7 Rhombus Formation created from four UAVs

Information about the equilateral formation consisting of four drones is shown in Figure 7 and Equation 8.

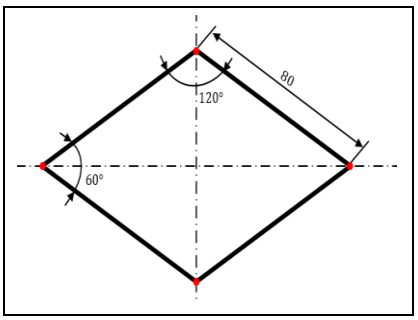


Figure 7. Rhombus formation geometry for 4 UAVs.

a	=	***distance between two UAVs***
x_i	=	*initial x coordinate of "i. UAV"*
$\bar{x}$	=	$\frac{\sum x_i}{4}$
y_i	=	*initial y coordinate of "i. UAV"*
$\bar{y}$	=	$\frac{\sum y_i}{4}$
R	=	*formation circle radius*
R	=	$\frac{a}{2}\sqrt{3}$
x_1	=	$\bar{x}$
y_1	=	$\bar{y} - \frac{a}{2}$
x_2	=	$\bar{x} - R$
y_2	=	$\bar{y}$
x_3	=	$\bar{x}$
y_3	=	$\frac{a}{2}$
x_4	=	R
y_4	=	$\bar{y}$

(8)

2.3.8 Rhombus formation created from four UAVs rhombus formation created from eight UAVs

In a rhombus formation with 8 drones, the distance between each drone should be equal. Drones rise from the ground at different coordinates and pass to the relevant formation within the "p" time with the command of the jury. The geometric representation and mathematical formulation of the relevant formation are shown in Figure 8 and Equation 9.

a	=	***distance between two UAVs***
x_i	=	*initial x coordinate of "i. UAV"*
$\bar{x}$	=	$\frac{\sum x_i}{8}$
y_i	=	*initial y coordinate of "i. UAV"*
$\bar{y}$	=	$\frac{\sum y_i}{8}$
R	=	*formation circle radius*
R	=	$a\sqrt{3}$
x_1	=	$\bar{x}$
y_1	=	$\bar{y} - a$
x_2	=	$\bar{x} - \frac{R}{2}$
y_2	=	$\bar{y} - \frac{a}{2}$
x_3	=	$\bar{x} - R$
y_3	=	$\bar{y}$
x_4	=	$\frac{R}{2}$
y_4	=	$\frac{a}{2}$
x_5	=	$\bar{x}$
y_5	=	a
x_6	=	$\bar{x} - \frac{R}{2}$
y_6	=	$\frac{a}{2}$
x_7	=	R
y_7	=	$\bar{y}$
x_8	=	$\frac{R}{2}$
y_8	=	$-\frac{a}{2}$

(9)

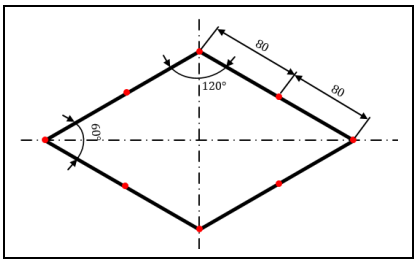


Figure 8. Rhombus formation geometry for 8 UAVs

2.3.9 Line formation

In line formation, 5 drones taking off from different coordinates are required to move on a single line with a certain "x" distance between them. Information about the formation is shown in Figure 9 and Equation 10.

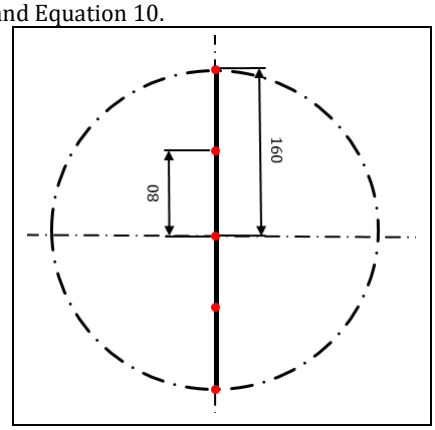


Figure 9. Line formation geometry.

a	=	***distance between two UAVs***
x_i	=	*initial x coordinate of "i. UAV"*
$\bar{x}$	=	$\frac{\sum x_i}{4}$
y_i	=	*initial y coordinate of "i. UAV"*
$\bar{y}$	=	$\frac{\sum y_i}{4}$
R	=	*formation circle radius*
R	=	$2 * a$
x_1	=	$\bar{x}$
y_1	=	$\bar{y}$
x_2	=	$\bar{x}$
y_2	=	$\frac{R}{2}$
x_3	=	$\bar{x}$
y_3	=	$\bar{x} - \frac{R}{2}$
x_4	=	$\bar{x}$
y_4	=	R
x_5	=	$\bar{x}$
y_5	=	$\bar{y} - R$

(10)

3 Solution methodology

The formation control problem is a type of problem where the solution becomes very difficult as the number of individuals in the swarm increases and a manual solution is impossible. Solving the problem using mathematical modelling is difficult and takes a lot of time, since individuals in the system are constantly changing places, adding/removing individuals, and the type of task can change at any time. In addition, the difficulty of the problem increases when individuals do not collide with each other, and battery status and trajectory tracking are considered. In this article, a new solution approach is developed for the formation control problem by using a simulated annealing algorithm based on geometric models. The formation control architecture is used in solving the problem in section 3.1. and the developed solution algorithm is in sections 3.2., 3.3. and 3.4 are also shown.

3.1 Formation control architecture

Trajectory tracking, anti-collision, stabilization, modularity, efficiency, non-dissipation, and dynamics are some of these indicators. To realize these indicators in a successful swarm duty, an architecture consisting of hierarchical layers must be created. In this article, a 5-layer control architecture is created for the swarm routing task, as shown in Figure 10.

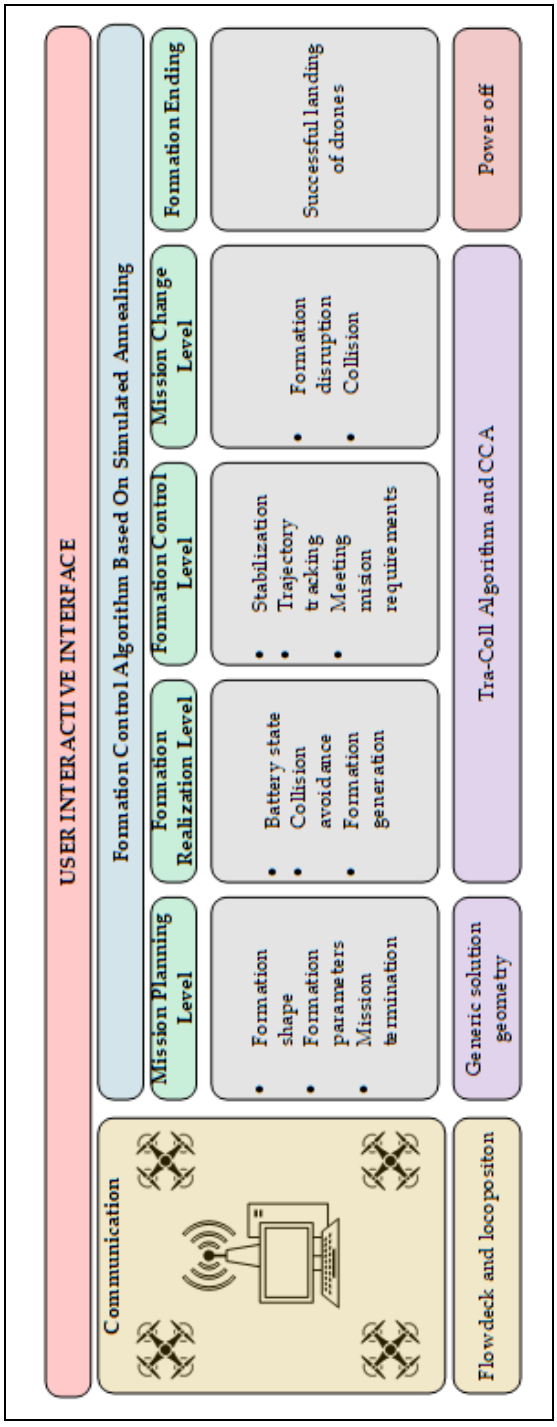


Figure 10. 5-layer formation control architecture [78].

At the Mission Planning Level, the tasks described in Chapter 4 and the formations to be applied in these tasks are planned. Parameters such as formation time, take-off time, landing time, hovering time, starting coordinates, total mission time, and number of UAVs are entered into the algorithm at this level.

At the formation realization level, using the proposed algorithm in section 3.2., taking into account the parameters of the previous level, the UAVs to be taken in the formation and their positions at each "t" time are determined. While determining the UAV movement routes, it is aimed that the two UAVs will not collide with each other and that the mission will be completed before the UAV battery capacity is exceeded.

3.2 Formation control algorithm based on simulated annealing

In this paper, Formation Control Algorithm Based on Simulated Annealing (FCA-SA) is developed to solve the HTUDL-S-UAV. The simulated annealing algorithm, which is a stochastic search, Kirckpatrik et al. developed by taking the physical annealing process of solids as an example. The algorithm progresses as iterative and uses different movement mechanisms to improve solution quality. While the movements increasing solution quality are accepted as the initial solution, actions that do not improve solution quality are admitted with a certain percentage so as not to get stuck local optimum. The Boltzman stochastic factor ($P = e^{(-\Delta E/T)}$) is also used for the acceptance probability of the poor-quality solution. The simulated annealing has many parameters [79]-[81]. Many parameters need to be decided in the simulated annealing algorithm. The objective function, selection of neighbouring solutions, initial solution, initial temperature, and cooling rate can be given as an example of these parameters.

In this paper, the objective function is the minimization of the total mission (operation) time. The swap method is used as the neighbour generation mechanism. The initial solution, initial temperature, cooling rating, and final temperature, which is the stopping criterion, were determined as a result of simulation experiments. In line with this information, the developed interface and the solution algorithm proposed for the problem is demonstrated in Figure 11 and Table 1.

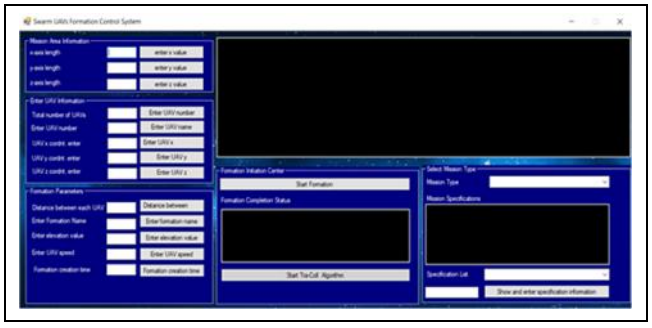


Figure 11. Interface developed for formation control.

Figure 11 shows the interface used for UAV pattern generation and control. In the system where mission information, number of UAVs and mission type are entered, the optimal formation structure and formation type are output. In addition, mission time and whether there is a collision or not are defined in the interface. Simulated Annealing algorithm is used in the interface.

Table 1. Formation optimization algorithm based on simulated annealing method.

$\rightarrow initial\ temperature = 1000; final\ temperature = 1;$

$\rightarrow cooling\ rate = 0.95;\ enter\ mission\ type;$

$\rightarrow enter\ mission\ parameters;$

$\rightarrow enter\ initial\ UAV\ speed\ and\ control\ information;$

$\rightarrow Randomly\ generate\ an\ initial\ solution = init_x;$

$\rightarrow Calculate\ fitness\ value;$

$\rightarrow f(init_x) = Calculatefitnessfunction(init_x);$

$\boldsymbol{while}\ (\boldsymbol{temperature} \leq \boldsymbol{final\ temperature})$

$\rightarrow x = new\ produced\ solution\ based\ on\ the\ swap\ mechanism$

$\rightarrow x = [order\ of\ mission, UAV\ x\ coordinate, UAV\ y\ coordinate\ ]$

$Calculatefitnessfunction(x)$

$\rightarrow update\ the\ global\ best\ solution\ and\ local\ best\ solution\ information\ to\ be\ passed\ to\ the\ next\ iteration\ according\ the\ fitness\ function;$

$\rightarrow If\ the\ global\ solution\ does\ not\ improve\ for\ a\ certain\ number\ of\ iterations \rightarrow PerturbationMechanism(x);$

$\rightarrow temperature = temperature * cooling\ rate;$

$\boldsymbol{Calculatefitnessfunction(x)}$

$\rightarrow fitnessfunction = totalmissionduration = takeoff\ time + formation\ time + landing\ time$

$\rightarrow if\ the\ mission\ area\ has\ been\ exceeded \rightarrow totalmissionduration = totalmissionduration * 1000;$

$\rightarrow If\ the\ departure\ time\ is\ more\ than\ the\ jury's\ mission\ departure\ time \rightarrow totalmissionduration = totalmissionduration * 1000;$

$\rightarrow totalmissionduration = Tra - Coll_Control(x);$

$\rightarrow If\ totalmissionduration\ is\ greater\ than\ the\ total\ mission\ time\ specified\ by\ the\ jury \rightarrow totalmissionduration = totalmissionduration * 1000;$

$\boldsymbol{Tra - Coll_Control(x)}$

$\rightarrow If\ two\ UAVs\ collided\ during\ the\ formation \rightarrow totalmissionduration = totalmissionduration * 1000;$

$\boldsymbol{Pertrurbation\ Mechanism}$

$\rightarrow$ "$Split\ the\ 'solution\ x'\ into\ two\ parts\ and\ reassemble\ it\ by\ swapping\ the\ parts;$

3.3 Tra-Coll (Trajectory-Collision) algorithm

Tra-Coll is an algorithm that controls whether it is progressing within the determined route of each UAV during operation. The algorithm tracks the distance of each UAV to the other UAVs, which is predetermined by the jury. If a deviation occurs in the trajectory or tracking distance, the algorithm instantly and automatically updates the heading of the UAV and keeps it on the mission route. The steps of the developed algorithm for the deviation control for any "t" time is calculated according to the formula in Equation 11.

$$
\begin{aligned}
N &= Total\ number\ of\ UAV \\
T &= Task\ end\ time \\
i = j &= The\ index\ number\ of\ the\ UAV: i = j = 1, \dots, N \\
t &= The\ time\ period\ in\ which\ the\ UAV\ is\ controlled: T = 1, \dots, T \\
x_{i,t} &= "x"\ coordinate\ at\ "t"\ time\ of\ "i".UAV \\
y_{i,t} &= "y"\ coordinate\ at\ "t"\ time\ of\ "i".UAV \\
x_b &= x coordinate\ to\ be\ found\ along\ the\ trajectory \\
y_b &= y coordinate\ to\ be\ found\ along\ the\ trajectory \\
sm &= permissible\ amount\ of\ deviation\ from\ the\ relevant\ coordinates \\
& xb - xi, t \le sm, \forall i\ and\ t \\
& yb - yi, t \le sm, \forall i\ and\ t
\end{aligned} \tag{11}
$$

In addition, the distance between each UAV needs to be maintained throughout the flight process. In this sense, the distances between UAVs are computed at every "t" time. If the distance between the UAV pair falls below the predetermined safety distance, the system gives a warning and updates the headings of the relevant UAVs to prevent collisions. Based on the above formulation, the distance between the two UAVs is calculated as follows in Equation 12.

$$
\begin{aligned}
d_{i,j,t} &= the\ distance\ between\ \text{UAV "i" and UAV "j"}\ at\ time\ t \\
a_{i,j,t} &= the\ safety\ distance\ between\ UAV\ a\ and\ UAV\ "b"\ at\ time\ t \\
d_{i,j,t} &= \sqrt{(x_{i,t} - x_{j,t})^2 - (y_{i,t} - y_{j,t})^2} \\
& \forall i, j, t \& i \neq j
\end{aligned} \tag{12}
$$

According to the above distance, the distance between the two UAVs is checked by the formula below in Equation 13.

$$d_{i,j,t} \ge a_{i,j,t} \tag{13}$$

3.4 Collision control algorithm

The Collision Control Algorithm (CCA) is a control mechanism used in the FCA-SA. This mechanism controls whether the UAVs collide at any time in the form produced in the solutions in the Algorithm. The information related to the algorithm is given in Figure 12 and Equation 14.

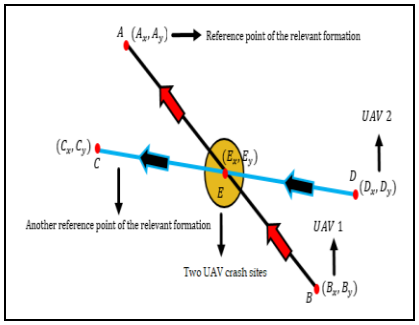


Figure 12. UAV collision control architecture.

$$
\begin{aligned}
T &= \frac{(D_y - C_y) * (C_x - A_x) - (C_y - A_y) * (D_x - C_x)}{(D_y - C_y) * (B_x - A_x) - (B_y - A_y) * (D_x - C_x)} \\
E_x &= A_x + (B_x - A_x) * T \\
E_y &= A_y + (B_y - A_y) * T \\
t_1 &= \frac{|BE|}{V_1} \qquad t_2 = \frac{|DE|}{V_2} \\
& t1 = t_2 \rightarrow \\
& There\ is\ a\ collision, the\ solution\ is\ cancelled \\
& t_1 \neq t_2 \rightarrow \\
& there\ is\ no\ collision, the\ solution\ is\ valid.
\end{aligned} \tag{14}
$$

4 Experimental study and analysis

In this article, the missions in the Teknofest 2021 Swarm UAV Competition are considered for experimental study. These missions are important to test the performance of the proposed algorithm in terms of genericity and dynamic. The information about these duties is provided below in Table 2.

Table 2. The missions in the application studies.

Mission No	Mission Name
1	Swarm Navigation Mission
2	Formation-Switching Mission
3	The mission to remove UAV from the Swarm
4	The mission of adding UAV to the Swarm
5	Swarm Rotation Mission
6	Swarm Division/Unification Mission
7	Trajectory Tracking Mission as a Swarm

Crazyfly 2.0 drone was used in Teknofest 2021 Swarm UAV Competition. Since Crazyfly 2.0 drone was used in Teknofest 2021 Swarm UAV Competition, all applications in the article were carried out on this drone. The flight area has a width of 3.5 m, a length of 3.5, and a height of 2 m, and is shown in the figure. "Loco positioning nodes" are placed at each corner of this flight area and are used for positioning UAVs. Besides, the "Loco positioning deck" and "Flow deck" are installed on each UAV for the positioning system. In Figures 13 and 14, the flight area set up for the experiments and the visuals of the flights are given.

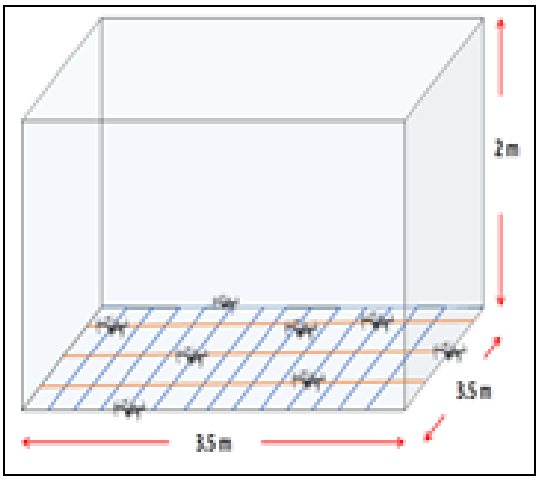


Figure 13. Flight area technical dimensions.



Figure 14. Real swarm flight area [82].

4.1 Swarm navigation mission

In this task, the swarm will be navigated to the desired landmarks in a way that preserves the desired formation. The flock will take off in the desired formation at an altitude of 1 meter and within 3 seconds, with a distance of 1 meter between them. After the takeoff phase, the swarm will maintain its formation for 15 seconds. Aiming at the specified landmarks, the swarm will begin its navigation mission. The swarm must reach each landmark within 3 seconds at the most. When the flock reaches each landmark, it will maintain its formation for 20 seconds and switch to the other landmark. Finally, the swarm will be returned to the starting point. At the final landmark, the herd will wait 20 seconds and move on to the descent phase. The swarm landing phase will take 5 seconds. Triangles will be determined by the jury. At all of these stages, the altitude of the swarm, and the distance between the UAVs and its formation should be maintained [83]. The information about Swarm Navigation Mission is given in Figure 15.

In Figure 15, Swarm Navigation Mission for Pentagon Formation is illustrated. The most important point in the mission is that each UAV remains in the same position throughout the operation. The developed algorithm has successfully performed the navigation task in all different formations. As an example, simulation videos of navigation tasks for the crescent formation and square formation are shown in links 1 and 2.

Mission Phases	Duration of the Mission Phase
Swarm Take-off	: Max 3 Seconds
Formation Protection of the Swarm	: 15 Seconds
Passage of the Swarm to the Triangulation	: Max 3 Seconds
Swarm Waiting After Triangulation	: 20 Seconds
Swarm Waiting for the Last Triangle	: 20 Seconds
Swarm Landing	: Max 3 Seconds

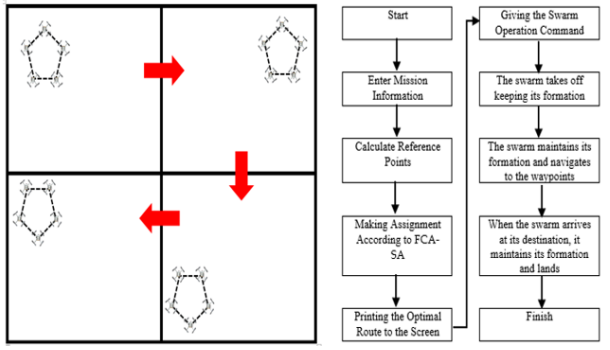
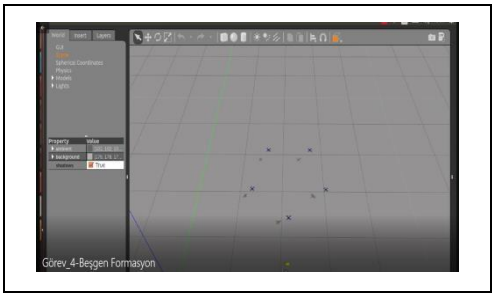
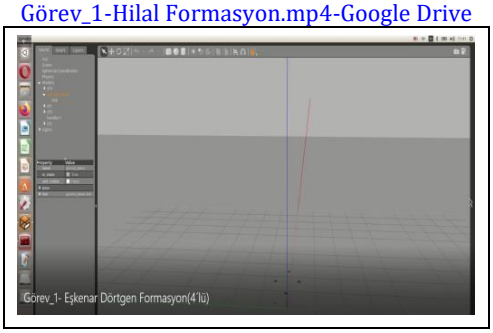


Figure 15. Swarm Navigation Mission and the solution architecture.



Link 1. Swarm Navigation Mission for Crescent formation.

Görev_1-Hilal Formasyon.mp4-Google Drive



Link 2. Swarm Navigation Mission for Rhombus formation

Görev_1-Eşkenar Dörtgen Formasyon(4'lü).mp4 - Google Drive

4.2 Formation-switching mission

In this mission, the swarm must take off in the formation requested by the jury and switch to a second different formation requested by the jury. The swarm will take off at an altitude of 1 meter to the desired formation and within 3 seconds, which will be 1 meter between the UAVs. It will retain its formation for "x" seconds after the take-off phase is complete. After this stage, the swarm will be asked to switch to the desired second formation within 3 seconds. During and after the transition phase, the herd should maintain its altitude and the distance between the UAVs. The 2nd formation must be protected for "y" seconds. After the formation protection phase, the swarm should descend within 3 seconds. Starting from the starting formation, the competitors may be asked to take more

than one formation. Features related to this mission are shown in Figure 16, [83].

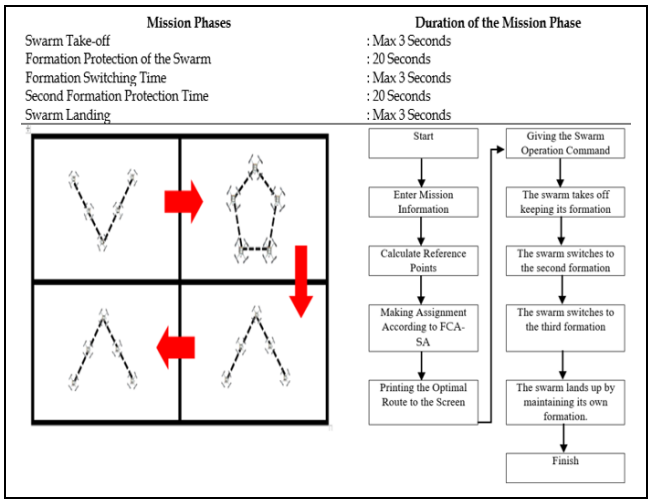
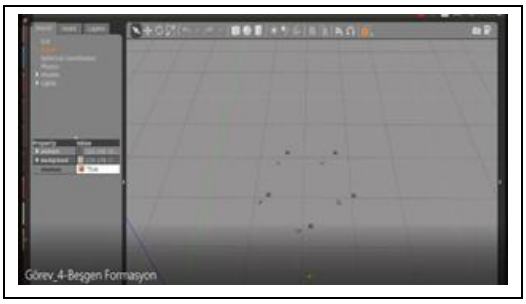


Figure 16. Formation-switching mission and the solution architecture.

The results of the application study for this task are given in the link 3 and 4.



Link 3. Pentagon>Line>Pentagon formation.

Görev_2-Beşgen-Çizgi-Beşgen Formasyon.mp4-Google Drive



Link 4. Square-rhombus-square formation.

Görev-2-Kare-Eşkenar Dörtgen (4'lü)-Kare Formasyon.m4v - Google Drive

4.3 The mission to remove UAVs from the swarm

UAVs randomly deployed on the ground rise to an altitude of 1 meter at the same time. Then the command to enter the formation is sent to the swarm system and the UAVs enter the desired formation. The entry time to the formation must be less than 3 seconds. After the formation is formed, a random UAV is selected and removed from the swarm manually by a person in charge. The remaining herd members wait while maintaining their altitude and formation for the specified time. Then the landing command is sent and it lands on the ground keeping the swarm formation. The details of the stated mission are shown in Figure 17 [83].

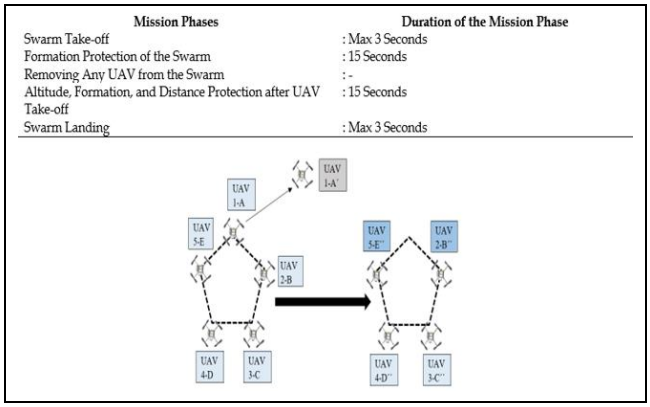
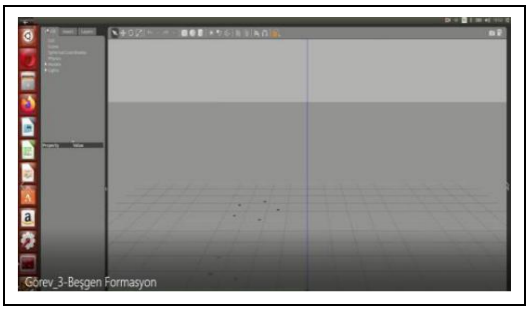


Figure 17. The mission to remove UAVs from the swarm and the solution architecture.

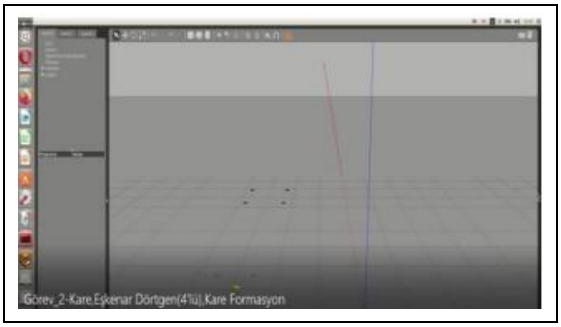
Some of the visuals related to the application work made by using the developed solution algorithm and considering the task information is shown in links 5 and 6.



Link 5. Remove/Add UAV For Pentagon formation

Görev-3- Beşgen Formasyon.mp4 - Google Drive

Since there is no guide UAV in the developed formation creation algorithm and the whole system is created by utilizing the formation center of gravity, other individuals will not be affected by this situation when any related individual leaves the formation. In this mechanism, the rapid change in the "x", and "y" coordinates of the UAV is considered in the determination of the individual removed from the swarm. If the change difference between the relevant coordinates is greater than the predetermined parameter value, the algorithm will perceive this change as removing the individual from the system and will make the related UAV passive. The formulation in Table 3 will be applied in calculating the relevant difference.



Link 6. Remove/Add UAV for Rhombus formation.

Görev-3- Eşkenar Dörtgen(4'lü) Formasyon.mp4 - Google Drive

Table 3. Coordinate change detection algorithm.

cp = $maximum\ difference\ between\ coordinates\ between\ any\ time\ "t"\ and\ "t+1"$

$y_{i,t}$ = $"y"\ coordinate\ of\ the\ "i."\ UAV\ at\ "(t)."\ time$

$x_{i,t+1}$ = $"x"\ coordinate\ of\ the\ "i."\ UAV\ at\ "(t+1)."\ time$

$y_{i,t+1}$ $"y"\ coordinate\ of\ the$ i.$UAV\ at\ "(t+1)."\ time$

$for\ t = 1; t \leq 15; t++$

$for\ i = 1; i \leq Number\ of\ UAVs; i++$

$if((|x_{i,t+1} - x_{i,t}|) > cp\ or\ (|y_{i,t+1} - y_{i,t}|) > cp\ )$

$Remove\ "i.\ UAV"\ from\ swarm\ array$

4.4 Swarm rotation mission

In this task, the swarm is required to turn at certain angles and reach the desired points while maintaining its formation. Information regarding the swarm rotation task is given in Figure 18.

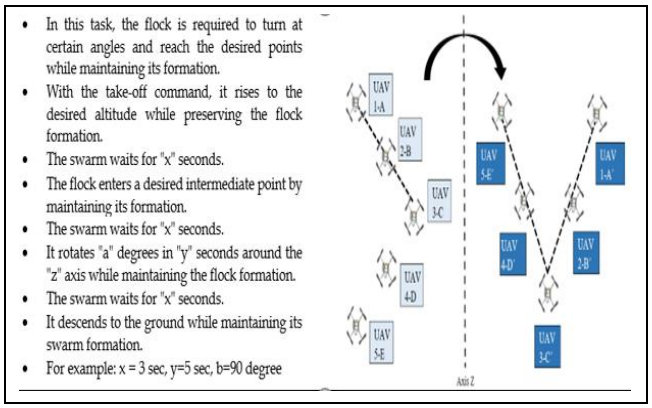


Figure 18. The swarm rotation mission and the solution architecture.

It is desirable to perform this mission at any angle, both clockwise and counterclockwise. To solve this problem, it is planned that the UAVs will make their turns by advancing with one-degree angles at v speed on the unit circle drawn according to the center of gravity of the formation. The unit circle structure and pentagonal formation examples related to the method are shown in Figures 19 and 20.

According to the formulas in Table 4, "x" and "y" coordinates for each degree are computed as in Table 5. Based on the radius formulas above, the "v" forward speed of the UAV is calculated using the formula below.

$$v = \frac{2 * \pi * r}{12} \quad (14)$$

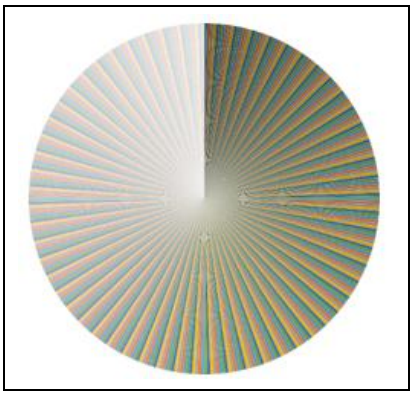


Figure 19. Unit circle made of angles of one degree.

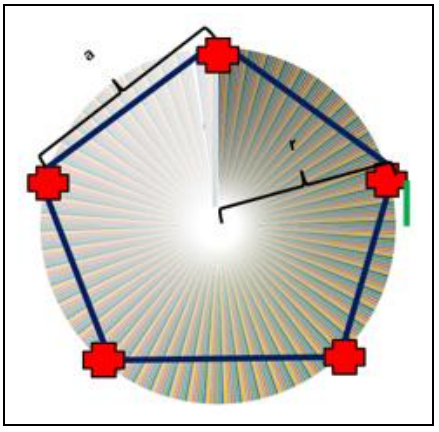


Figure 20. Pentagonal formation with "a" Length, "r" radius.

In Figure 20, the length "a" indicates the distance between each UAV. According to the "a" value, the "r" radius is calculated for each formation in Table 4.

Table 4. Coordinate calculation for each degree in the rotation task.

$Angle\ (\alpha)$	$Coordinate\ information$	"x" $coordinate\ of\ the\ UAV$	"y" $coordinate\ of\ the\ UAV$
0	x_0, y_0	x_0	y_0
1	x_1, y_1	$x_1 = r * cos(\alpha)$	$y_1 = r * cos(\alpha)$
2	x_2, y_2	$x_2 = r * cos(\alpha)$	$y_2 = r * cos(\alpha)$
3	x_3, y_3	$x_3 = r * cos(\alpha)$	$y_3 = r * cos(\alpha)$
⋮	⋮	⋮	⋮
358	x_{358}, y_{358}	$x_{358} = r * cos(\alpha)$	$y_{358} = r * cos(\alpha)$
359	x_{359}, y_{359}	$x_{359} = r * cos(\alpha)$	$y_{359} = r * cos(\alpha)$
360	x_{360}, y_{360}	$x_{360} = r * cos(\alpha)$	$y_{360} = r * cos(\alpha)$

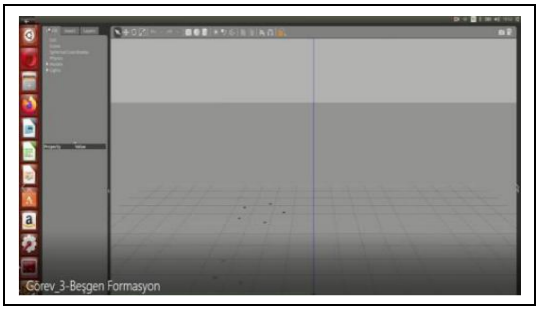
The algorithm developed for the rotation mission of the UAVs is shown in the table 5.

Table 5. Rotation mission algorithm.

Step 1. x[i, k] = "x" position ofthe "i. " UAV in the "k. " step & x[i, 0] = the current reference position" y[i, k] = "y" position ofthe "i. " UAV in the "k. " step & y[i, 0] = the current reference position" ang[i, k] = the angle of the i. UAV in the "k". step & ang[i, 0] = the current

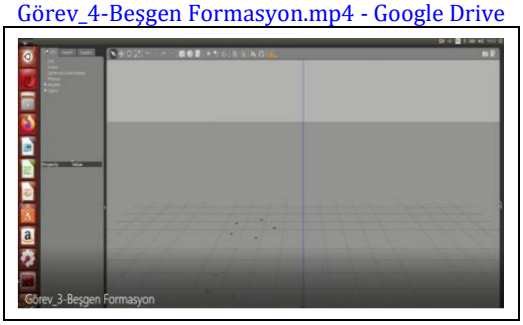
Step 2.
```
for k = 1; k ≤ 360;  k++
    for i = 1; i ≤ the number of UAVs; i++
        if the rotation is clockwise
            ang[i,k] = ang[i,k−1] + 1
            x_{i,k} = r * cos(ang[i,k]) & y_{i,k} = r * sin(ang[i,k])
            if (ang[i,k] > 360) then ang[i,k] = 0
        if the rotation is counterclockwise
            ang[i,k] = ang[i,k−1] − 1
            x_{i,k} = r * cos(ang[i,k]) & y_{i,k} = r * sin(ang[i,k])
            if (ang[i,k] < 0) then ang[i,k] = 360
    end
end
```

Some of the application studies for the rotation mission are given in the link 7 and 8.



Link 7. Rotation mission for pentagon formation.

Görev_4-Beşgen Formasyon.mp4 - Google Drive



Link 8. Rotation mission for the square formation.

Görev_4-Kare Formasyon.m4v - Google Drive

4.5 Swarm division/unification mission

The mission details for Swarm Division/Unification are shown in Figure 21. The solution approach used in the merger and separation task is expressed below on the star formation. Initially, the flock in star formation is divided into V and pentagonal formations. In the next stage, the two swarms separated will merge to form a "star formation".

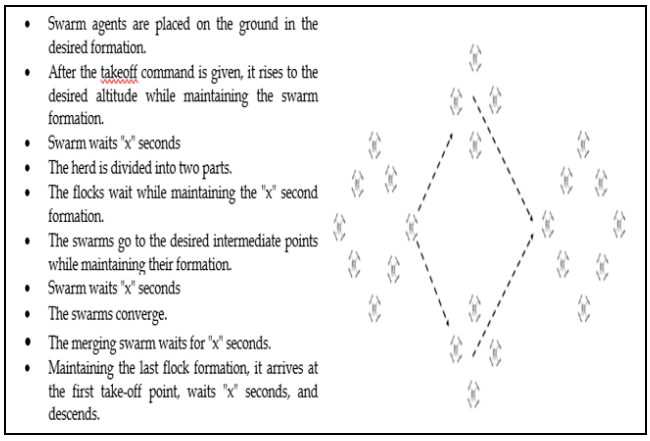


Figure 21. The swarm rotation mission and the solution architecture.

In the formation in Figure 22, there is a UAV at each reference point and these are indicated by letters. The first task in the separation of formations is to determine which UAV will join which formation and which reference points will be assigned. According to the number of individuals in the formation, the UAVs will be assigned to two different arrays according to the "M" axis and each array will form the UAVs of the relevant formation. While forming groups, the closest UAVs to each other are selected and clustered. Based on the determined UAV groups, the centers of gravity of each group are established. Then, reference diagonal points are determined by reference to these centroids and using the formation generation algorithms in section 2.2. Finally, according to the results obtained from the FCA-SA, the UAVs in the clusters are assigned to the reference points. The centers of gravity of pentagonal and triangular formations are shown in Figure 23, and the formations and reference points to which UAVs are assigned as a result of swarm separation in Figure 24.

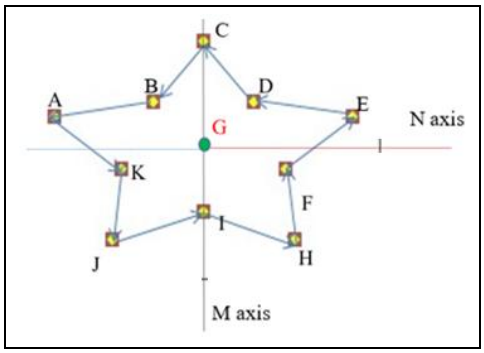


Figure 22. Star formation in the starting phase.

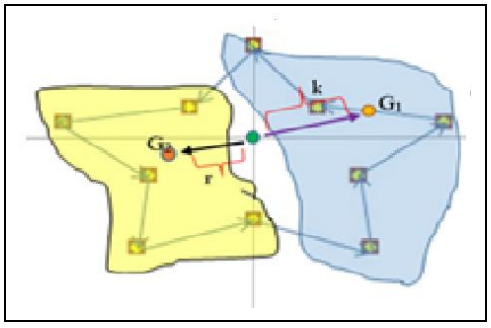


Figure 23. Centers of gravity of pentagonal and V formations.

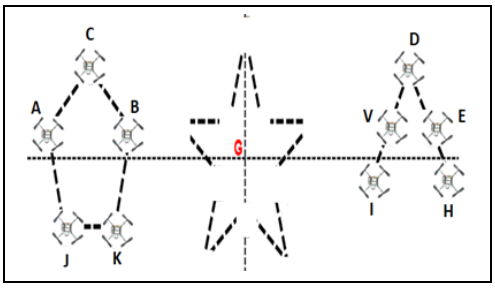


Figure 24. UAVs assigned to separate swarms.

In the merger task, the center of gravity of the merger formation of the previously separated swarms is determined as the center of gravity of the mission area. According to this center of gravity, the reference diagonal points of the desired formation are determined and the function of assigning UAVs in two different swarms to the relevant reference points is performed. The FCA-SA Algorithm is used to determine which UAV will be assigned to which point. A visual representation of the swarm reunion is shown in Figure 25. The videos of the experimental studies for this mission are shown in links 9 and 10.

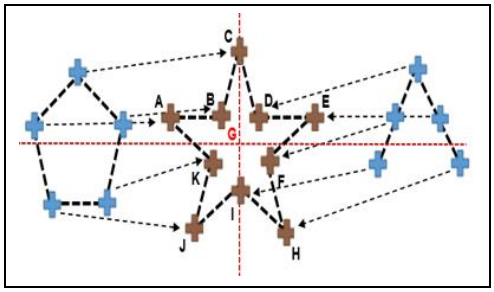
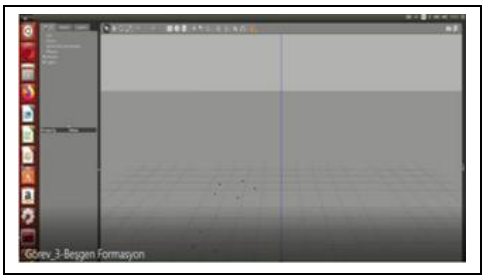
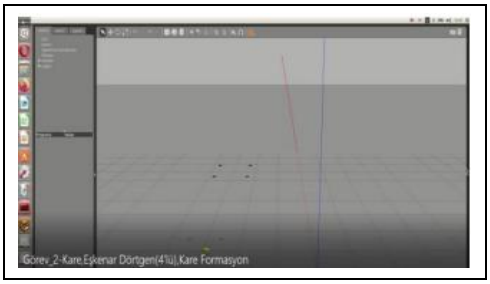


Figure 25. Reunification of the swarms.



Link 9. Rhombus(8's) → 2x Rhombus(4's) → Rhombus(8's) Formation.

Görev_5-Eşkenar Dörtgen(8'li),2x-Eşkenar Dörtgen(4'lü),Eşkenar Dörtgen(8'li) Formasyon.mp4 - Google Drive



Link 10. Rhombus(8's) → Rhombus(4's) and Square → Rhombus (8's) Formation

Görev_5-Eşkenar Dörtgen(8'li), Kare, Eşkenar Dörtgen(4'lü), Eşkenar Dörtgen(8'li) Formasyon.mp4 - Google Drive

4.6 Trajectory tracking mission as a swarm

In this mission, the swarm takes off in the designated formation and completes the operation by following the pattern defined by the jury. The specifications for the mission are shown in Figure 26.

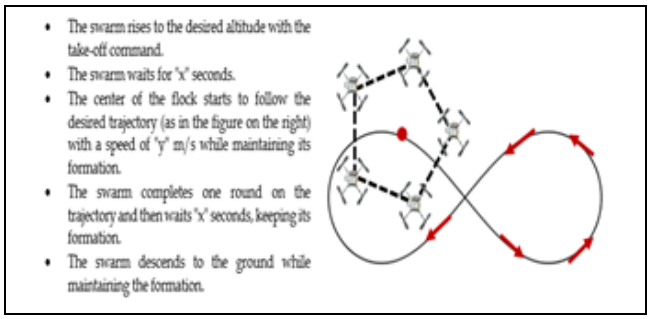
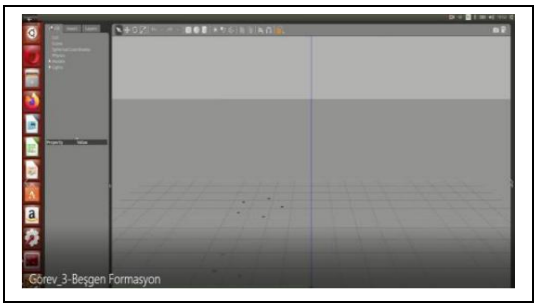


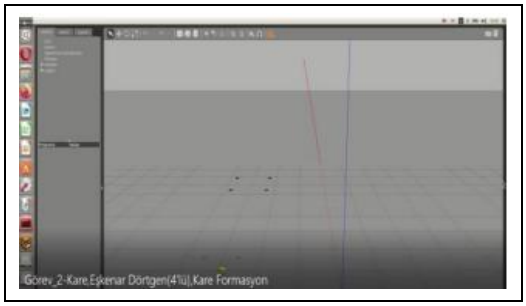
Figure 26. Trajectory Tracking Mission as a Swarm and the solution architecture.

Some of the application studies related to the mission performed using FCA-SA are shown in links 11 and 12.



Link 11. Trajectory Tracking Mission for Square formation.

Görev-6- Kare Formasyon.mp4 - Google Drive



Link 12. Trajectory Tracking Mission for Rhombus Formation (4's).

Görev_6- Eşkenar Dörtgen(4'lü) Formasyon .mp4 - Google Drive

4.7 Experimental design and application

In this paper, nine different missions and six different formation types are defined. For each formation task, five different formation types were defined and the success of the algorithm was tested on a total of 30 scenarios. With these experiments set, the performance of the algorithm was tested for different starting positions, number of IHAs, formation types and formation tasks. Summary information about the sample experimental set is given in Table 6.

Table 6 shows the number of UAVs, mission specifications, formation types and locations in the relevant scenario. This information differs in each scenario.

When clicking on the scenario names in Table 7, detailed information about the scenarios is presented. In addition, the UAV assignments and total mission time for the formation as a result of the optimization are presented in Table 7. For example, in the M1F2 scenario, 5 UAVs were used and the swarm navigation task (4.1) was performed.

Table 6. Sample experiment set.

Scenario No: M…F…			
Mission Name:	Swarm Navigation	Departure Time:	3 seconds
Formation Type:	Pentagon	Duration of Stay in Formation:	20 seconds
Number of UAVs:	3	Time for the swarm to move to the next point:	30 seconds
Distance between UAVs:	0.8 meter	Landing duration:	5 seconds
Mission Height:	1 meter	Mission Area:	3.5 meter (x) 3.5 meter (y) 2 meter (z)

UAV Start Location Information			
UAV velocity	5 meter/seconds		
	Coordinate Information		
	x	y	z
UAV-1	0.5	0.5	0
UAV-2	1	1	0
UAV-3	1.5	1.5	0
UAV-4	2	2	0
UAV-5	2.5	2.5	0

Mission Location Information			
Starting Point [0,0,0]	Navigation-1 [1,1,1]	Navigation-1 [2,2,1]	Landing Point [2,2,0]

Table 7. Scenario information and application study results.

Scenario No (Link)	Mission Type	Mission Name	Total Number of UAVs	Optimal Mission Time (seconds)	Optimal Mission (Link)	Details
M1F1	1	4.1.	3	56,6448	OptRest	
		[Reference Point] – [label of the UAV]				
		[0,1,2] - [0, 1, 2]				
M1F2	1	4.1.	5	56,79881	OptRest	
		[Reference Point] – [label of the UAV]				
		[0,1,2,3,4] - [1, 0, 3, 2, 4]				
M1F3	1	4.1.	5	57,13983	OptRest	
		[Reference Point] – [label of the UAV]				
		[0,1,2,3,4] - [0, 2, 4, 1, 3]				
M1F4	1	4.1.	6	57,38266	OptRest	
		[Reference Point] – [label of the UAV]				
		[0,1,2,3,4,5] - [2, 1, 0, 5, 3, 4]				
M2F1	2	4.2.	5	36,82478	OptRest	
		[Reference Point] – [label of the UAV]				
		[0,1,2,3,4] - [1, 0, 3, 4, 2]				
M2F2	2	4.2.	5	36,84202	OptRest	
		[Reference Point] – [label of the UAV]				
		[0,1,2,3,4] - [2, 0, 3, 4, 1]				
M2F3	2	4.2.	5	36,86703	OptRest	
		[Reference Point] – [label of the UAV]				
		[0,1,2,3,4] - [1, 0, 3, 4, 2]				

Table 7. Continued.

Scenario No (Link)	Mission Type	Mission Name	Total Number of UAVs	Optimal Mission Time (seconds)	Optimal Mission Details (Link)
M2F4	2	4.2.	5	37,49077	OptRest
			[Reference Point] – [label of the UAV]		
			[0,1,2,3,4] - [1, 3, 2, 4, 0]		
M3F1	3	4.3.	5	31,81641	OptRest
			[Reference Point] – [label of the UAV]		
			[0,1,2,3,4] - [2, 0, 3, 1, 4]		
M3F2	3	4.3.	6	32,37558	OptRest
			[Reference Point] – [label of the UAV]		
			[0,1,2,3,4,5] - [2, 0, 5, 3, 1, 4]		
M3F3	3	4.3.	10	32,03764	OptRest
			[Reference Point] – [label of the UAV]		
			[0,1,2,3,4,5,6,7,8,9] - [0, 3, 4, 5, 7, 1, 8, 6, 9, 2]		
M3F4	3	4.3.	4	31,77630	OptRest
			[Reference Point] – [label of the UAV]		
			[0,1,2,3] - [0, 3, 1, 2]		
M4F1	4	4.4.	10	48,865507	OptRest
			[Reference Point] – [label of the UAV]		
			[0,1,2,3,4,5,6,7,8,9] - [0, 6, 4, 5, 2, 1, 9, 3, 8, 7]		
M4F2	4	4.4.	6	49,257288	OptRest
			[Reference Point] – [label of the UAV]		
			[0,1,2,3,4,5] - [2, 5, 0, 1, 3, 4]		
M4F3	4	4.4.	4	47,943598	OptRest
			[Reference Point] – [label of the UAV]		
			[0,1,2,3] - [0, 3, 1, 2]		
M4F4	4	4.4.	3	47,3187067	OptRest
			[Reference Point] – [label of the UAV]		
			[0,1,2] - [1, 0, 2]		
M5F1	5	4.5.	8	63,31696	OptRest
			[Reference Point] – [label of the UAV]		
			[0,1,2,3,4,5,6,7] - [6, 1, 0, 3, 5, 7, 4, 2]		
M5F2	5	4.5.	10	63,058963	OptRest
			[Reference Point] – [label of the UAV]		
			[0,1,2,3,4,5,6,7,8,9] - [0, 6, 7, 5, 2, 8, 4, 3, 9, 1]		
M5F3	5	4.5.	8	63,290337	OptRest
			[Reference Point] – [label of the UAV]		
			[0,1,2,3,4,5,6,7] - [7, 1, 0, 3, 6, 5, 4, 2]		
M5F4	5	4.5.	10	62,783912	OptRest
			[Reference Point] – [label of the UAV]		
			[0,1,2,3,4,5,6,7,8,9] - [3, 6, 4, 2, 7, 8, 0, 9, 5, 1]		
M6F1	6	4.6.	4	35,398707	OptRest
			[Reference Point] – [label of the UAV]		
			[0,1,2,3] - [0, 3, 2, 1]		

Table 7. Continued.

Scenario No (Link)	Mission Type	Mission Name	Total Number of UAVs	Optimal Mission Time (seconds)	Optimal Mission Details (Link)
M6F2	6	4.6.	3	34,857218	OptRest
			[Reference Point] – [label of the UAV]		
			[0,1,2] - [1, 0, 2]		
M6F3	6	4.6.	6	39,2844345	OptRest
			[Reference Point] – [label of the UAV]		
			[0,1,2,3,4,5] - [2, 4, 0, 3, 1, 5]		
M6F4	6	4.6.	5	36,76892755	OptRest
			[Reference Point] – [label of the UAV]		
			[0,1,2,3,4] - [1, 3, 0, 4, 2]		

As a result of the optimization, UAV 1 was assigned to reference point 0 of the triangle formation and UAV 2 was assigned to reference point 3. The minimum mission time was calculated as 56,53211. The details of the task are given in the link in the first and last column of the table. The time spent by each UAV in M1F2 during the relevant mission is shown in Table 8. The UAV with the highest mission time in the table constituted the final mission duration of the formation.

Table 8. Time spent by each UAV in the M1F2 mission

Stage	UAV1	UAV2	UAV3
Take-off	0.310630752	0.249087255	0.210875426
Formation Protection	15	15	15
Transition to Next Point	0.410744581	0.410000007	0.410744581
Formation Protection	20	20	20
Return to the starting flock point	0.410744581	0.410000007	0.410744581
Formation Protection	20	20	20
Landing	0.4	0.4	0.4
Total time	56.53211	56.46908	56.43236
Stage	UAV4	UAV5	
Take-off	0.100158962	0.264398358	
Formation Protection	15	15	
Transition to Next Point	0.410744581	0.410744581	
Formation Protection	20	20	
Return to the starting flock point	0.410744581	0.410744581	
Formation Protection	20	20	
Landing	0.4	0.4	
Total time	56.32164	56.48588	
General Mission Time = MAX(UAV1, UAV2, UAV3, UAV4, UAV) = 56.53211			

In the M1F4 problem in Figure 27, 6 UAVs were asked to create a crescent formation and perform the navigation task (4.1). As a result of the optimization study, the method created 6 different reference points for the crescent formation based on the geometric solution approach and assigned UAVs to the reference points according to the mission parameters and UAV technical constraints.

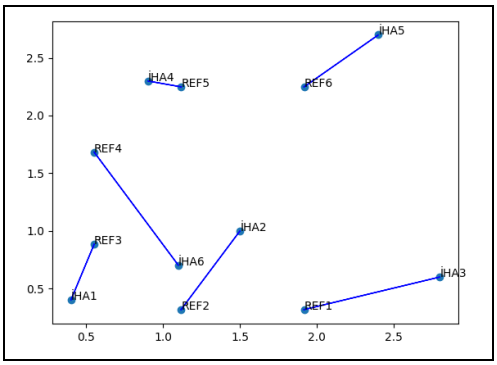


Figure 27. UAV start coordinates and creating of reference point for Crescent Formation in M1F4 (İHA=UAV, REF=Reference Point).

The UAVs were initially dropped at different points and entered the crescent formation in the air after the take-off order. The initial coordinates of the UAVs were UAV1: [0.58, 2.99, 0.0], UAV2: [1.04, 1.57, 0.0], UAV3: [2.06, 2.92, 0.0]. Then, the UAV formed the relevant formation and navigated as a swarm. Finally, the landing took place. The steps of the swarm throughout the mission are shown in Figure 28.

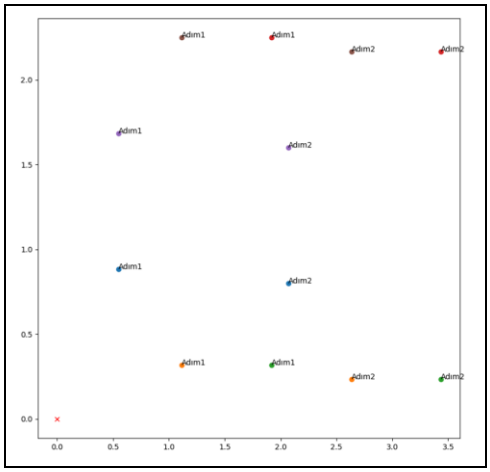


Figure 28. Step-by-step movement of UAVs throughout the mission for M1F4 (Adım= Step).

Figure 28 shows the movements of the UAVs in the x and y axis at a height of 1 meter.

Figure 29 shows the UAV initial coordinates for the M6F4 mission (UAV 1: [0.30, 1.80, 0.00] UAV 2: [1.50, 0.60, 0.00] UAV 3: [2.00, 1.10, 0.00] UAV 4: [0.80, 0.40, 0.00] UAV 5: [2.40, 1.90, 0.00]) and the reference points and UAV assignments determined as a result of the optimization are shown. In this scenario, the task of swarming trajectory tracking (4.6) with a pentagonal formation is performed and the movements of the UAVs during the mission are shown in Figure 30.

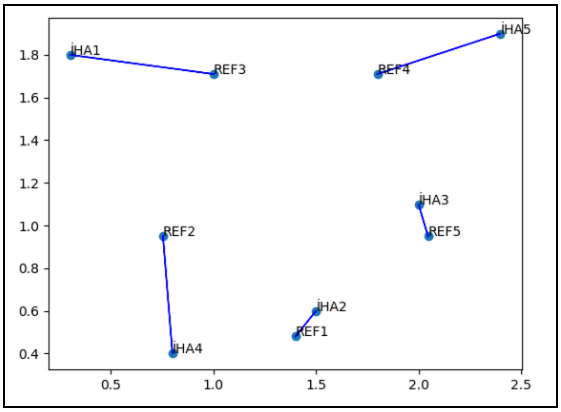


Figure 29. UAV start coordinates and creating of reference point for pentagon formation in M6F4.

Figure 30 graphically shows the movement of the flock in the pentagonal formation during the mission period. In the figure, the coordinates of each UAV are tracked in stages.

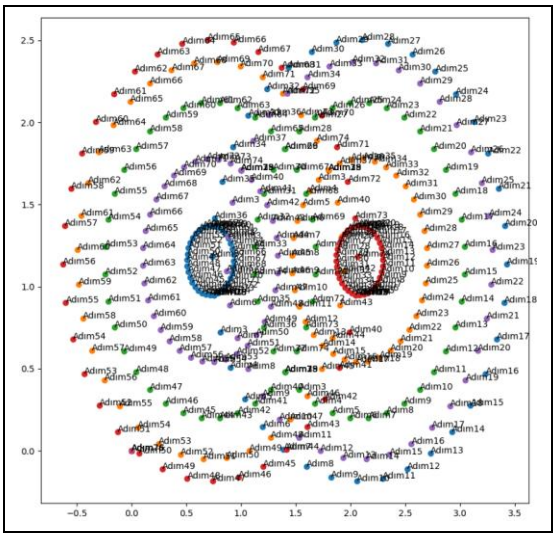


Figure 30. Step-by-step movement of UAVs throughout the mission for M6F4

In addition, the results for all scenarios are shown in the "OptRes" links.

5 Conclusion

The formation control for Swarm Unmanned Aerial Vehicles is an optimization problem that includes many constraints and parameters. In this article, the problem is examined under the conditions "homogeneous", " Time-Window ", "Central Control Architecture", "Uncertain", "Dynamic Structure", and "Leaderless ". The FCA-SA Algorithm, which is a new solution approach, is developed to solve the problem and the proposed methodology is implemented on real data used in the TEKNOFEST-2021 Swarm UAV Competition. The competition consists of 9 different formations and 7 different tasks, and the tasks are required to be completed within the specified time limits under the task area and time constraints. The application study using Crazfly 2.0 drones was carried out on the ROS Simulation Platform and in a real competition environment. As a result of the experimental studies, the developed algorithm completed all the tasks within the minimum operation time. In addition, it was determined that the swarms did not disrupt their formation, the UAVs did not collide with each other and did not deviate from their trajectories during the operations. The proposed solution approach reacted quickly to all formation changes and task changes and was able to generate the optimal tour route within seconds. As a result of the scenario studies, the robustness of the algorithm was proven on different data sets. Furthermore, the analysis results showed that the UAVs completed their mission without violating the competition area boundary. Finally, the algorithm has produced optimal solutions for tasks involving uncertain situations and dynamic conditions. Thanks to this structure, the algorithm will be able to be used in the routing of different autonomous vehicles and the control of their formations.

In future studies, UAV formation control is an area that has been intensively studied in recent years and will continue to be studied in the coming years due to both defense problems and the development of UAV technologies. It is predicted that the first priority area for researchers will be applications in the defense sector and in the battlefield. Formation of formations by taking into account certain and uncertain situations in this field will create new branch problems. Secondly, applications in the field of agriculture are expected to have a wide range of applications. The use of these technologies in problems such as spraying, fertilization, development of agricultural products, protection from pests and other animals will create an application area for UAV formation control. In addition, unmanned land and sea vehicles will continue to constitute other application areas of this formation control problem.

With the development of new mathematical models for these problems and the use of artificial intelligence and metaheuristic algorithms in a hybrid way, it is predicted that more effective solutions will be obtained in shorter times. In addition, hybridization of swarm UAV problems with image processing techniques and the problems of preventing communication interference can be different study topics for researchers. Finally, it is expected that researchers will be directed to multi-objective optimization studies by working with different UAVs and considering different parameters and objectives.

6 Author contribution statements

In this paper, Ukbe Üsame Uçar generates optimal tour routes using the simulated annealing algorithm and taking into account the specific requirements of each mission. He implemented the routes on swarm drones and reported the results. Burak Tanyeri in this paper, created the geometric architectures of the formation control algorithms and realized their technical drawings and designs. He analyzed and reported the implementation results.

7 Ethics committee approval and conflict of interest statement

"There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared". "There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared".

8 References

[1] He L, Bai P, Liang X, Zhang J, Wang W. "Feedback formation control of UAV swarm with multiple implicit leaders". *Aerospace Science and Technology*, 72, 327-334, 2018.

[2] Oh KK, Park MC, Ahn HS. "A survey of multi-agent formation control". *Automatica*, 53, 424-440, 2015.

[3] Couceiro MS, Vargas PA, Rocha RP, Ferreira NM. "Benchmark of swarm robotics distributed techniques in a search task". *Robotics and Autonomous Systems*, 62(2), 200-213, 2014.

[4] Olfati-Saber R. "Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 51(3), 401-420, 2006.

[5] Toksöz, M. A., Oğuz, S., and Gazi, V. "Decentralized formation control of a swarm of quadrotor helicopters". *In 2019 IEEE 15th International Conference on Control and Automation (ICCA)*, United Kingdom, 16-19 July 2019.

[6] Turpin M, Michael N, Kumar V. "Concurrent assignment and planning of trajectories for large teams of interchangeable robots". *In 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Karlsruhe, Germany, 6-10, May 2013.

[7] Olfati-Saber R, Fax JA, Murray RM. "Consensus and cooperation in networked multi-agent systems". *Proceedings of the IEEE*, 95(1), 215-233, 2007.

[8] You DI, Shim DH. "Autonomous formation flight test of multi-micro aerial vehicles". *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 61(1), 321-337, 2011.

[9] Zhi-wei H, Jia-hong L, Ling C, Bing W. "A hierarchical architecture for formation control of multi-UAV". *Procedia Engineering*, 29, 3846-3851, 2012.

[10] Li S, Shao X, Zhang W, Zhang Q. "Distributed multicircular circumnavigation control for UAVs with desired angular spacing". *Defence Technology*, 31(2024), 429-446, 2024.

[11] Wang J, Wu YX, Chen YQ, Ju S. "Multi-UAVs collaborative tracking of moving target with maximized visibility in urban environment". *Journal of the Franklin Institute*, 359(11), 5512-5532, 2022.

[12] Chai S, Yang Z, Huang J, Li X, Zhao Y, Zhou D. "Cooperative UAV search strategy based on DMPC-AACO algorithm in restricted communication scenarios". *Defence Technology*, 31(2024), 295-311, 2024.

[13] STM Teknolojik Düşünce Merkezi. "Sürü İHA Sistemleri Modern Harp İçin Bir Gelecek Öngörüsü". https://thinktech.stm.com.tr/uploads/docs/1608905682_stm-suru-iha-sistemleri.pdf? (02.02.2022).

[14] Rout R, Subudhi B. "A backstepping approach for the formation control of multiple autonomous underwater vehicles using a leader–follower strategy". *Journal of Marine Engineering & Technology*, 15(1), 38-46, 2016.

[15] Wang J, Wang C, Wei Y, Zhang C. "Sliding mode based neural adaptive formation control of underactuated AUVs with leader-follower strategy". *Applied Ocean Research*, 94(101971), 1-9, 2020.

[16] Gao Z, Guo G. "Fixed-time leader-follower formation control of autonomous underwater vehicles with event-triggered intermittent communications". *IEEE Access*, 6, 27902-27911, 2018.

[17] Ghamry KA, Zhang Y. "Formation control of multiple quadrotors based on leader-follower method". *In 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems*, Colorado, USA, 9-12 June 2015.

[18] Han Z, Guo K, Xie L, Lin, Z. "Integrated relative localization and leader–follower formation control". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 64(1), 20-34, 2018.

[19] Raghuwaiya K, Sharma B, Vanualailai J. "Leader-follower based locally rigid formation control". *Journal of Advanced Transportation*, 1-12, 2018.

[20] Tong WU, Jie WANG, Bailing TIAN. "Periodic event-triggered formation control for multi-UAV systems with collision avoidance". *Chinese Journal of Aeronautics*, 35(8), 193-203, 2022.

[21] Ullah N, Mehmood Y, Aslam J, Shaoping WANG, Phoungthong K. "Fractional order adaptive robust formation control of multiple quad-rotor UAVs with parametric uncertainties and wind disturbances". *Chinese Journal of Aeronautics*, 35(8), 204-220, 2022.

[22] Dai J, Hu Q, Liu X, Zhang Y, Zhu J. "Cluster head selection method of multiple UAVs under COVID-19situation". *Computer Communications*, 196, 141-147, 2022.

[23] Cheng W, Jiang B, Zhang K, Ding SX. "Robust finite-time cooperative formation control of UGV-UAV with model uncertainties and actuator faults". *Journal of the Franklin Institute*, 358(17), 8811-8837, 2021.

[24] Liu H, Meng Q, Peng F, Lewis FL. "Heterogeneous formation control of multiple UAVs with limited-input leader via reinforcement learning". *Neurocomputing*, 412, 63-71, 2020.

[25] Xie Y, Han L, Dong X, Li Q , Ren Z. "Bio-inspired adaptive formation tracking control for swarm systems with application to UAV swarm systems". *Neurocomputing*, 453, 272-285, 2021.

[26] Jiaqi S, Li T, Hongtao Z, Xiaofeng L, Tianying X. "Adaptive multi-UAV path planning method based on improved gray wolf algorithm". *Computers and Electrical Engineering*, 104, 108377, 2022.

[27] Hartley J, Shum HP, Ho ES, Wang H, Ramamoorthy S. "Formation control for UAVs using a Flux Guided approach". *Expert Systems with Applications*, 205, 117665, 2022.

[28] Li J, Liu J, Huangfu S, Cao G, Yu D. Leader-follower formation of light-weight UAVs with novel active disturbance rejection control. *Applied Mathematical Modelling*, 117, 577-591, 2023.

[29] Do HT, Hua HT, Nguyen MT, Nguyen CV, Nguyen HT, Nguyen HT, Nguyen NT. "Formation control algorithms for multiple-uavs: a comprehensive survey". *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, 8(27), 1-13, 2021.

[30] Zheng X, Zong C, Cheng J, Xu J, Xin S, Tu C, Chen S, Wang W. "Visually smooth multi-UAV formation transformation". *Graphical Models*, 116, 101111, 2021.

[31] Hartley J, Shum HP, Ho ES, Wang H, Ramamoorthy S. "Formation control for UAVs using a flux guided approach". *Expert Systems with Applications*, 205, 117665, 2022.

[32] Feng Q, Hai X, Sun B, Ren Yi, Wang Z, Yang D, Feng R. "Resilience optimization for multi-UAV formation reconfiguration via enhanced pigeon-inspired optimization". *Chinese Journal of Aeronautics*, 35(1), 110-123, 2022.

[33] Yan Z, Han L, Li X, Dong X, Li Q, Ren Z. Event-"Triggered formation control for time-delayed discrete-Time multi-Agent system applied to multi-UAV formation flying". *Journal of the Franklin Institute*, 360(5), 3677-3699, 2023.

[34] Wu Y, Gou J, Ji H, Deng J. "Hierarchical mission replanning for multiple UAV formations performing tasks in dynamic situation". *Computer Communications*, 200(2023), 132-148, 2023.

[35] Zear A, Ranga V, Bhushan K. "Coordinated network partition detection and bi-connected inter-partition topology creation in damaged sensor networks using multiple UAVs". *Computer Communications*, 203, 15-29, 2023.

[36] Dou L, Cai S, Zhang X, Su X, Zhang R. "Event-triggered-based adaptive dynamic programming for distributed formation control of multi-UAV". *Journal of the Franklin Institute*, 359(8), 3671-3691, 2022.

[37] Zhao T, Yu X, Liu P, Liu L. "Ultraviolet anti-collision and localization algorithm in UAV formation network". *Optik*, 192(162919), 1-12, 2019.

[38] Trujillo MA, Becerra HM, Gómez-Gutiérrez D, Ruiz-León J, Ramírez-Treviño A. "Hierarchical task-based formation control and collision avoidance of UAVs in finite time". *European Journal of Control*, 60, 48-64, 2021.

[39] Alam MM, Moh S. "Joint topology control and routing in a UAV swarm for crowd surveillance". *Journal of Network and Computer Applications*, 204, 103427, 2022.

[40] Huang J, Sun W. "A method of feasible trajectory planning for UAV formation based on bi-directional fast search tree". *Optik*, 221(165213), 1-16, 2020.

[41] Xu J, Deng Z, Ren X, Xu L, Liu D. "Invulnerability optimization of UAV formation based on super wires adding strategy". *Chaos, Solitons & Fractals*, 140, 110185, 1-10, 2020.

[42] Li Y, Xu Y, Xue X, Liu X, Liu X. "Optimal spraying task assignment problem in crop protection with multi-UAV systems and its order irrelevant enumeration solution". *Biosystems Engineering*, 214, 177-192, 2022.

[43] Jiaqi S, Li T, Hongtao Z, Xiaofeng L, Tianying X. "Adaptive multi-UAV path planning method based on improved gray wolf algorithm". *Computers and Electrical Engineering*, 104, 108377, 2022.

[44] Pang B, Low KH, Lv C. "Adaptive conflict resolution for multi-UAV 4D routes optimization using stochastic fractal search algorithm". *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 139, 103666, 2022.

[45] Do HT, Hua HT, Nguyen MT, Nguyen CV, Nguyen HT, Nguyen HT, Nguyen NT. "Formation control algorithms for multiple-uavs: a comprehensive survey". *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, 8(27), 1-13. 2021.

[46] Wu X, Yang Z, Huo J, Zhang, J. "UAV formation control based on consistency". *In 2015 7th International Conference on Modelling, Identification and Control*, Sousse, Tunisia, 18-20 December 2015.

[47] Dong X, Yu B, Shi Z, Zhong Y. "Time-varying formation control for unmanned aerial vehicles: Theories and applications". *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 23(1), 340-348, 2014.

[48] Liang Y, Dong Q, Zhao Y. "Adaptive leader–follower formation control for swarms of unmanned aerial vehicles with motion constraints and unknown disturbances". *Chinese Journal of Aeronautics*, 33(11), 2972-2988, 2020.

[49] Guo K, Li X, Xie L. "Simultaneous cooperative relative localization and distributed formation control for multiple UAVs". *Science China Information Sciences*, 63(1), 1-3, 2020.

[50] Fu X, Pan J, Wang H, Gao X. "A formation maintenance and reconstruction method of UAV swarm based on distributed control". *Aerospace Science and Technology*, 104, 105981, 2020.

[51] Yu B, Dong X, Shi Z, Zhong Y. "Formation control for quadrotor swarm systems: Algorithms and experiments". *In Proceedings of The 32nd Chinese Control Conference*, Shaanxi, China, 26-28 July 2013.

[52] Speck C, Bucci DJ. "Distributed UAV swarm formation control via object-focused, multi-objective SARSA". *In 2018 Annual American Control Conference (ACC)*, Wisconsin, USA, 27-29 June 2018.

[53] Zhu C, Liang X, He L, Liu L. "Demonstration and verification system for UAV formation control". *In 2017 3rd IEEE International Conference on Control Science and Systems Engineering (ICCSSE)*, Beijing, China, 17-19 August 2017.

[54] Ali ZA, Han Z, Masood RJ. "Collective motion and self-organization of a swarm of UAVs: A cluster-based architecture". *Sensors*, 21(11), 3820, 2-19, 2021.

[55] Yang F, Wang P, Zhang Y, Zheng L, Lu J. "Survey of swarm intelligence optimization algorithms". *In 2017 IEEE International Conference on Unmanned Systems*, Beijing, China, 27-29 October 2017.

[56] Fu X, Pan J, Wang H, Gao X. "A formation maintenance and reconstruction method of UAV swarm based on distributed control". *Aerospace Science and Technology*, 104, 105981, 2020.

[57] Wu Y, Gou J, Hu X, Huang Y. "A new consensus theory-based method for formation control and obstacle avoidance of UAVs". *Aerospace Science and Technology*, 107, 106332, 2020.

[58] Wang J, Han L, Dong X, Li Q , Ren, Z. "Distributed sliding mode control for time-varying formation tracking of multi-UAV system with a dynamic leader". *Aerospace Science and Technology*, 111, 106549, 2021.

[59] Li S, Fang X. "A modified adaptive formation of UAV swarm by pigeon flock behavior within local visual field". *Aerospace Science and Technology*, 114, 106736, 2021.

[60] Liu B, Li A, Guo Y, Wang C. "Adaptive distributed finite-time formation control for multi-UAVs under input saturation without collisions". *Aerospace Science and Technology*, 20, 107252, 2022.

[61] Shen J, Wang S, Zhan X. "Multi-UAV cluster-based cooperative navigation with fault detection and exclusion capability". *Aerospace Science and Technology*, 124, 107570, 2022.

[62] Chen L, Duan H. "Collision-free formation-containment control for a group of UAVs with unknown disturbances". *Aerospace Science and Technology*, 126, 107618, 2022.

[63] Shen Y, Wei C. "Multi-UAV flocking control with individual properties inspired by bird behavior". *Aerospace Science and Technology*, 130, 107882, 2022.

[64] An B, Wang B, Fan H, Liu L, Hu H, Wang Y. "Fully distributed prescribed performance formation control for UAVs with unknown maneuver of leader". *Aerospace Science and Technology*, 130, 107886, 2022.

[65] Shao X, Liu H, Zhang W, Zhao J, Zhang Q. "Path driven formation-containment control of multiple UAVs: A path-following framework". *Aerospace Science and Technology*, 135, 108168, 2023.

[66] Yu B, Dong X, Shi Z, Zhong Y. "Formation control for quadrotor swarm systems: Algorithms and experiments". *In Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference*, Shaanxi, China, 26-28 July 2013.

[67] Xiaoning Z. "Analysis of military application of UAV swarm technology". *In 2020 3rd International Conference on Unmanned Systems*, Harbin, China, 27 – 28 November 2020.

[68] Cevik P, Kocaman I, Akgul AS, Akca B. "The small and silent force multiplier: a swarm UAV-electronic attack". *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 70(1), 595-608, 2013.

[69] Xiong F, Li A, Wang H, Tang L. "An SDN-MQTT based communication system for battlefield UAV swarms". *IEEE Communications Magazine*, 57(8), 41-47, 2019.

[70] Gulosh NJ. Employment of Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance Drone Swarms to Enhance Ground Combat Operations. MSc Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey – California, United States, 2018.

[71] Li R, Ma H. "Research on UAV swarm cooperative reconnaissance and combat technology". *In 2020 3rd International Conference on Unmanned Systems*, Harbin, China, 27-28 November 2020.

[72] Ju C, Son HI. "Multiple UAV systems for agricultural applications: Control, implementation, and evaluation". *Electronics*, 7(9), 162, 2018.

[73] Mukherjee A, Misra S, Raghuwanshi NS. "A survey of unmanned aerial sensing solutions in precision agriculture". *Journal of Network and Computer Applications*, 148, 102461, 2019.

[74] Thornton S, Gallasch GE. "Swarming logistics for tactical last-mile delivery". *In International Conference on Science and Innovation for Land Power*, Adelaide, Australia, 5-6 September 2018.

[75] Kuru K, Ansell D, Khan W, Yetgin H. "Analysis and optimization of unmanned aerial vehicle swarms in logistics: An intelligent delivery platform". *IEEE Access*, 7, 15804-15831, 2019.

[76] Ghamry KA, Kamel MA, Zhang Y. "Multiple UAVs in forest fire fighting mission using particle swarm optimization". *In 2017 International Conference On Unmanned Aircraft Systems*, Miami, USA, 13-16 June 2017.

[77] Brust MR, Strimbu BM. "A networked swarm model for UAV deployment in the assessment of forest environments". *In 2015 IEEE Tenth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing*, Singapore, 7-9 April 2015.

[78] Zhi-wei H, Jia-hong L, Ling C, Bing W. "A hierarchical architecture for formation control of multi-UAV". *Procedia Engineering*, 29, 3846-3851, 2012.

[79] Shuttleworth R, Golden BL, Smith S, Wasil E. "Advances in meter reading: heuristic solution of the close enough traveling salesman problem over a street network. in the vehicle routing problem: latest advances and new challenges". *Operations Research/Computer Science Interfaces Series*, 43, 487-501, 2008.

[80] Erdoğan Akbulut H, Özçelik F, Saraç, T. "Fakülte seviyesinde üniversite ders çizelgeleme problemi için bir tavlama benzetimi algoritması". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(1), 17-30, 2024.

[81] Özden G, Sarıçiçek İ. "Çapraz sevkiyatta kamyon çizelgeleme problemi için çözüm yaklaşımları". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(1), 82-88, 2019.

[82] Tanyeri B, Bayrak Ural Z, Uçar UU. "The Experimental Study of Attitude Stabilization Control for Programmable Nano Quadcopter". *Journal of Aviation*, 6(1), 1-11, 2022.

[83] Havacilik, Uzay Ve Teknoloji Festivali Teknofest. "Sürü İnsansız Hava Aracı (İHA) Yarışması Teknik Şartnamesi". İstanbul, Türkiye, 2021.

[84] Golmisheh FM, Shamaghdari S. "Heterogeneous optimal formation control of nonlinear multi-agent systems with unknown dynamics by safe reinforcement learning". *Applied Mathematics and Computation*, 460, 128302, 2024.

[85] Du Z, Qu X, Shi J, Lu J. "Formation control of fixed-wing UAVs with communication delay". *ISA Transactions*, 146, 154-164, 2024.

[86] Peng H, Huang B, Jin M, Zhu C, Zhuang J. "Distributed finite-time bearing-based formation control for underactuated surface vessels with Levant differentiator". *ISA Transactions*, 147, 239-251, 2024.

[87] Zhu Y, Li S, Guo G, Yuan P, Bai J. "Formation control of UAV–USV based on distributed event-triggered adaptive MPC with virtual trajectory restriction". *Ocean Engineering*, 294, 116850, 2024.

[88] Li X, Qin H, Li L, Xue Y. "Adaptive fixed-time fuzzy formation control for multiple AUV systems considering time-varying tracking error constraints and asymmetric actuator saturation". *Ocean Engineering*, 297, 116936, 2024.

[89] Shi J, Ye M, Ding L, Xu S. "Distributed least-distance formation control for euler–lagrange systems: a game-based approach". *Control Engineering Practice*, 142, 105743, 2024.

[90] Rai A, Mou S. Safe region multi-agent formation control with velocity tracking. *Systems & Control Letters*, 186, 105776, 2024.

[91] Fei Y, Shi P, Li Y, Liu Y, Qu X. "Formation control of multi-agent systems with actuator saturation via neural-based sliding mode estimators". *Knowledge-Based Systems*, 284, 111292, 2024.

[92] Xi J, Wang C, Wang L, Qin M, Xia K, Zheng Y. "Optimal formation strategy for interconnected quadrotor drones: Theory and experiment". *Aerospace Science and Technology*, 144, 108771, 2024.

[93] Qi X. "Event-Triggered predictive control algorithm for Multi-AUV formation modeling". *Informatica*, 48(2024), 127-142, 2024.

[94] Yıldız B. İnsansız Hava Aracı (İHA) Sürüsünün Akıllı Yol Planlaması. Doktora Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2024.

[95] Lee J, Ji D, Cho H, Baeg S, Jeong S. "Fault-Coping algorithm for improving leader–follower swarm-control algorithm of unmanned surface vehicles". *Applied Sciences*, 14(8), 3444, 2024.

[96] Yiğit A, Kalaycı AO, Akdemir E. "Autonomous TDOA localization via swarm UAV concept". *In 2024 32nd Signal Processing and Communications Applications Conference*, Mersin, Türkiye, 15-18 May 2024.

[97] Huang Y, Meng Z, Dimarogonas DV. "Prescribed performance formation control for second-order multi-agent systems with connectivity and collision constraints". *Automatica*, 160, 111412, 2024.

[98] Yu K, Li Y, Lv M, Tong S. "Distributed optimal formation control of multiple unmanned surface vehicles with stackelberg differential graphical game". *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*, 5(8), 4058-4073, 2024.

[99] Imran IH, Kurtulus DF, Memon AM, Goli S, Kouser T, Alhems LM. "Distributed robust formation control of heterogeneous Multi-UAVs with disturbance rejection". *IEEE Access*, 12(2024), 55326-55341, 2024.

[100] Bu Y, Yan Y, Yang Y. "Advancement challenges in UAV swarm formation control: A comprehensive review". *Drones*, 8(7), 320, 2024.

[101] Li M, Liu H, Xie F, Huang H. "Adaptive distributed control for leader–follower formation based on a recurrent SAC algorithm". *Electronics*, 13(17), 3513, 2024.

[102] Wu J, Luo C, Min G, McClean S. "Formation control algorithms for Multi-UAV systems with unstable topologies and hybrid delays". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 73(9), 12358-12369, 2024.

[103] Nguyen K, Dang VT, Pham DD, Dao PN. "Formation control scheme with reinforcement learning strategy for a group of multiple surface vehicles". *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 34(3), 2252-2279, 2024.

[104] Liu Y, Liu J, He Z, Li Z, Zhang Q , Ding Z. "A survey of multi-agent systems on distributed formation control". *Unmanned Systems*, 12(05), 913-926, 2024.

[105] Okutan HE, Baykara M. "OptiRoute: Operational routing algorithm for swarm robots". *In 2024 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference*, Ankara, Türkiye, 16-18 October 2024.

[106] Li H, Hu J, Zhou Q, Ghosh BK. "Safe formation control of multiple unmanned aerial vehicles: control design and safety-stability analysis". *Control Theory and Technology*, 22(2024), 442-454, 2024.

[107] Wang D, Ge SS, Liang X, Li D. "Time-synchronized formation control of unmanned surface vehicles". *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 9(10), 6567-6575, 2024.

Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 31(7), 1192-1210, 2025

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Stratejik yönetim temelli sürdürülebilir kalite güvencesi modeli: gelişmekte olan bir devlet üniversitesinde uygulamalar

Establishing a sustainable quality assurance model through strategic management: a case study in a developing state university

Mustafa Egemen Taner[1*], *Samet Sadırlı*[1]

[1]Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Tarsus Üniversitesi, Mersin, Türkiye.
metaner@tarsus.edu.tr, sametsadirli@tarsus.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 14.10.2024 Düzeltme Tarihi/Revision: 15.04.2025 doi: 10.5505/pajes.2025.48323
Kabul Tarihi/Accepted: 21.04.2025 Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Eğitimin önemi, gelecek nesillerin ilerlemesini teşvik etme kapasitesine bağlıdır. Etkili işleyen bir eğitim sistemi bu hedefe ulaşmada önemli bir rol oynamaktadır. Dolayısıyla, gelişmekte olan eğitim kurumlarında en elverişli eğitim, öğretim ve öğrenme fırsatlarını garanti etmek için bir kalite güvencesi sisteminin kurulması zorunlu hale gelmektedir. Yükseköğretim kurumlarında ise bu sistemler iç ve dış kalite güvencesi ile akreditasyon prosedürlerinin planlanmasına ve uygulanmasına ilişkin tüm ilkeleri kapsamaktadır. Bu çalışmada, kuruluş aşamasını tamamlamış ve gelişmekte olan bir devlet üniversitesinde kalite güvencesi sisteminin yapılandırılmasını amaçlayan süreçlerin sistematik olarak uygulanması için bir yönetim modeli önerilmektedir. Önerilen model, periyodik izleme – iyileştirme faaliyetleri ve paydaş katılımının içselleştirilmesi yoluyla, stratejik yönetim sürecine dayalı yenilikçi bir kalite güvencesi sisteminin mühendislik disiplini bakış açısıyla kurulmasını amaçlamaktadır. Model, özellikle yükseköğretim kurumlarındaki süreçlerin kalite güvencesi kapsamında yönetilmesine ve eğitim-öğretim ortamında sürdürülebilir kalite standartlarının sağlanmasına yönelik stratejik bir çerçeve sunmaktadır. Bu kapsamda paydaş memnuniyetini değerlendirmeye yönelik bir anket sistematiği de çalışma kapsamında geliştirilerek ilgili yükseköğretim kurumunda uygulanmıştır. Uygulamadan elde edilen veriler kullanılarak gerçekleştirilen faktör ve regresyon analizleri sonucunda, önerilen modelin yüksek düzeyde paydaş memnuniyeti sağlayabildiğini ve kurum yönetiminin hangi alanlara odaklanarak memnuniyeti sürdürülebilir kılabileceğini göstermiştir. Yeni kurulan ve gelişmekte olan yükseköğretim kurumları için bu çalışma, rehber niteliğindedir.

Anahtar kelimeler: Kalite güvencesi sistemi, Paydaş memnuniyeti, Faktör analizi, Stratejik yönetim.

Abstract

The importance of education is tied to its capacity to promote the progress of future generations. A well-functioning educational system plays a key role in achieving this goal. Therefore, in developing educational institutions, it becomes essential to establish a quality assurance system to guarantee the most favorable educational, teaching, and learning opportunities. In higher education institutions, these systems encompass the planning and implementation of all principles concerning internal and external quality assurance and accreditation procedures. This paper proposes a management model for the systematic implementation of processes aimed at structuring a quality assurance system in a newly established and developing state university. The proposed model, based on a strategic management process with periodic monitoring-improvement activities and the internalization of stakeholder participation, aims to establish an innovative quality assurance system with a perspective rooted in engineering disciplines. The model presents a strategic framework for managing processes within higher education institutions to maintain sustainable quality standards in educational environments. A survey methodology to assess stakeholder satisfaction was developed and implemented in this context. Factor and regression analyses based on the data obtained indicate that the proposed model can achieve high stakeholder satisfaction and identifies the areas in which institutional management should focus to maintain this satisfaction sustainably. This paper serves as a guide for newly established and developing higher education institutions.

Keywords: Quality assurance system, Stakeholder satisfaction, Factor analysis, Strategic management.

1 Giriş

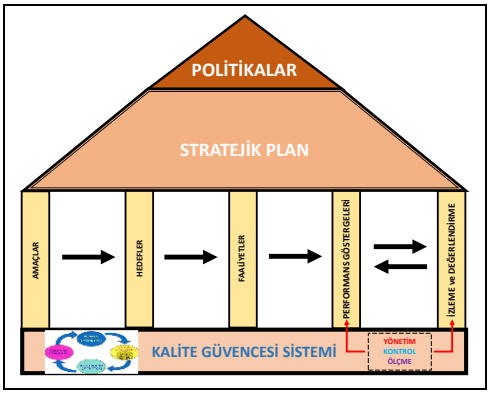
Kalite Güvencesi Sistemi (KGS) yükseköğretim kurumlarının eğitim-öğretim, araştırma-geliştirme, toplumsal katkı faaliyetleri ile idari hizmetlerinin iç ve dış kalite güvencesi ile akreditasyon süreçlerini planlama ve uygulama temelini oluşturur. Bu sistem, bir kuruma dair ulusal ve uluslararası standartları karşılayan bir yapıyla başlar, ancak zaman içinde kurumun amaçlarına ve hedeflerine uyumlu hale gelerek kurumsal performans yönetim sistemine dönüşür. Yeni kurulmuş ve gelişme aşamasında olan yükseköğretim kurumlarında stratejik yönetim esaslı KGS hizmetlerin kalitesini korumayı, sürekli iyileştirme felsefesini teşvik etmeyi ve paydaş memnuniyetini artırmayı amaçlar. Bu amaç, kurumun rekabetçi olabilmesine ve uzun vadede başarı elde etmesine yardımcı olur.

Kalite güvencesi ile doğrudan ilişkili olan stratejik yönetimin başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan çerçeveler kurum politikaları ile oluşturulmaktadır. Politikalar, organizasyonun uzun vadeli gelişim yol haritasını belirleyen ilkelere, düzenlemelere ve standartlara atıfta bulunan metinlerdir. Organizasyonların kapsamı, beklentileri, hedefleri, sahiplik yapısı ve kaynakları yani diğer bir deyişle kurumların misyonu, vizyonu, değerleri ve hedefleri kurum politikaları ile belirlenmektedir. Stratejik yönetim ise söz konusu hedeflere nasıl ulaşılacağını belirlemek için politika metinlerini kullanır. İçinde bulunduğumuz dijitalleşme ve dijital dönüşüm çağı, kurumları, 5 yıldan daha kısa sürede söz konusu politikaları güncellemeye zorlayan dinamiklere sahiptir. Dolayısıyla bu

*Yazışılan yazar/Corresponding author

anlamda, stratejik yönetim modelinin uygulanması, kurumlara önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu hususlar yükseköğretim kurumları için değerlendirildiğinde, yasal zorunlukların çok daha ötesinde tercih edilebilirliklerini arttırarak önemli rekabet avantajı yarattığını da görmek mümkündür.

Stratejik yönetim modelinin kapsamında amaçlar, hedefler, faaliyetler, tüm bunları ölçmek için kullanılan performans göstergeleri ile modelin etkinliğini anlamaya yarayan izleme ve değerlendirme süreci yer almaktadır. Bu yapılanmada, yönetim-kontrol-ölçme faaliyetleri ile KGS'nin etkileşimi sağlanmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Stratejik yönetim modeli.

Figure 1. Strategic management model.

Özellikle, performans göstergelerinin tespiti ile ölçme faaliyetini ve akademik ve idari faaliyet raporları gibi kapsamlı değerlendirme raporları ile izleme ve değerlendirme sürecinin kontrol faaliyetini yerine getirmesi, kalite güvencesini yönetilebilir kılmaktadır. Ayrıca, KGS sürekli iyileştirme felsefesini barındıran PUKÖ (Planla, Uygula, Kontrol Et ve Önlem Al) döngüsü gibi önemli bir yönetim aracı içerdiğinden, modelin sürdürülebilirliğini de sağlamaktadır. Sürekli iyileştirme anlayışına dayanan PUKÖ döngüsü, kalite yönetimi sistemlerinin temel yapı taşlarındandır. Bu model kapsamında süreçler planlama, uygulama, kontrol ve önlem alma aşamalarıyla döngüsel olarak yönetilmekte ve her aşama bir sonraki adımı besleyecek şekilde yapılandırılmaktadır. KGS, ulusal ve uluslararası standartları, belgelendirmeleri ve kurumsal hedefleri izleyerek oluşturulur. Bu husus, girdi ve çıktı bazlı değerlendirmelerde standartların göz önünde bulundurulmasını ve amaç ve hedeflere uygunluğun temel kriter olmasını destekler. Yükseköğretim kurumları için stratejik yönetim ve kalite güvencesi prensiplerini benimsemek, rekabetçi bir konumda olabilmek ve eğitim kalitesini artırabilmek için önemlidir. KGS yükseköğretim kurumlarının eğitim-öğretim, araştırma-geliştirme, toplumsal katkı ve uluslararasılaşma gibi temel faaliyet alanlarında kalitenin sürekliliğini ve gelişimini sağlamayı hedefleyen bütüncül bir yaklaşımdır.

Çalışmanın odak noktasında yer alan yeni kurulan ve gelişmekte olan üniversiteler kavramı ile son 5-7 yıl içerisinde kurulmuş, kurumsal altyapıları henüz tam olarak kurgulanmamış, yönetişim süreçleri dinamik bir yapıda olan ve akademik-idari insan kaynağı planlaması gelişim aşamasında olan üniversiteler tanımlanmaktadır. Bu üniversitelerde kalite güvencesi sistemleri henüz tam anlamıyla kurumsallaşmadığından, kalite yönetimi süreçlerinde sistematik bir yapı oluşturulması ve sürekli iyileştirme mekanizmalarının hayata geçirilmesi büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, paydaş beklentilerinin belirlenmesi, stratejik yönetim süreçlerine entegrasyonu ve performans göstergelerinin oluşturulması gibi kritik aşamalar, gelişmekte olan üniversiteler için daha fazla planlama ve veri odaklı karar alma süreçlerini gerektirmektedir. Çalışma kapsamında önerilen model, bu kurumsal dinamikleri göz önünde bulundurarak, yeni kurulan ve gelişmekte olan üniversitelerin ihtiyaçlarına yönelik stratejik yönetim tabanlı bir kalite güvencesi yaklaşımı sunmaktadır. Modelin en önemli özgün yönlerinden biri, kalite yönetim süreçlerini sadece mevzuat uyumu ve akreditasyon gereklilikleri çerçevesinde ele almak yerine, sistematik ve mühendislik tabanlı bir yaklaşımla sürekli gelişimi desteklemesidir. Böylece, kalite süreçlerinin kurumsal kültüre entegre edilmesi ve uzun vadede sürdürülebilir kılınması amaçlanmaktadır.

Yükseköğretim kurumlarında kalite güvencesi, kurumların faaliyet alanlarında sürekli iyileşmeyi sağlamak amacıyla sistematik olarak yürütülmesi gereken bir süreçtir. Bu süreç aynı zamanda, kurumların stratejik hedeflerine ulaşmasını ve paydaş memnuniyetini artırmasını da hedeflemektedir. Bilimsel literatür incelendiğinde, son yıllarda yükseköğretim kurumlarında kalite güvencesi sistemlerinin ve stratejik yönetim yaklaşımlarının, önemli sayıda bilimsel çalışmaya konu olduğu görülmektedir. Özellikle paydaş memnuniyetine dayalı sistemler, kalite akreditasyon süreçleri ve dijital dönüşüm temelli kalite yönetimi konularına odaklanan güncel araştırmalar, yükseköğretim yönetiminde sistematik ve sürdürülebilir yaklaşımların benimsenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, Yükseköğretim Kalite Kurulu'nun (YÖKAK) 2024 yılında düzenlediği Yükseköğretimde Kalitenin İçselleştirilmesi ve İyileştirilmesi temalı YÖKAK Uluslararası Kalite Güvencesi ve Akreditasyon Konferansında da bu konuların önemi vurgulanmış olup, son yıllarda yapılan çalışmaların kalite güvencesi süreçlerini iyileştirmede etkin bir yol haritası sunduğu görülmektedir.

Bu bağlamda Çelik, Bologna Süreci kapsamında yürütülen iki döngülü sisteme geçiş, öğrenci ve personel hareketliliğinin teşvik edilmesi, Avrupa Kredi Transfer Sisteminin uygulanması ve kalite güvencesine ve ulusal yeterlilik çerçevesine yönelik çalışmaların Avrupa Yükseköğretim Sistemi üzerindeki etkisini incelemiştir [1]. Eleştirel bir bakış açısıyla değerlendirme yapılan çalışmada, kurgulanan/kurgulanmaya çalışılan sistemlerin yükseköğretim kurumlarında bürokratikleştirmeye, tek tipleştirmeye ve hiyerarşikleşmeye sebep olduğu belirtilmiştir. Avrupa haricinde gerçekleştirilen bir çalışmada Almussalam, Suudi Arabistan'ın lise sonrası eğitim sisteminin demografik değişikliklere ve artan katılım taleplerinin yanı sıra ekonomik ve endüstriyel kalkınma ve uluslararası rekabete maruz kalma nedeniyle hızla genişlediğini tespit ederek Suudi Arabistan'da yeni kalite güvencesi ve akreditasyon sisteminin uygulanmasındaki önemli sorunları ve zorlukları vurgulamıştır [2]. Benzer şekilde Miliani Cezayir Yükseköğretim Sistemi için iç kalite kültürünün önemini, KGS'deki uyumunu ve yüksek öğretim kurumlarında KGS'yi değerlendirmiştir [3]. Çalışma kapsamında ilgili bakanlığın 2030 yılına kadar olan hedeflerinde yer alan Lisans-Master-Doktora eğitim paketi, ulusal yeterlilikler çerçevesi, KGS, referans kalite güvencesi çerçevesi, ulusal standartlar ve temel performans göstergeleri konularına yönelik uygulanmalar sunulmuştur. Koçdar ve Kapar Türkiye'deki uzaktan eğitim programları için program akreditasyon uygulamalarını inceleyerek bu alandaki sorunları tespit edip, çözüm önerileri geliştirmeyi amaçlamıştır [4]. Türkiye'deki

dokuz ulusal akreditasyon kuruluşundan yetkililerin değerlendirici olarak yer aldığı çalışmada veriler anket ve yarı yapılandırılmış görüşmeler yoluyla toplanmıştır. Çalışma sonucunda, mevcut akreditasyon kuruluşlarının herhangi bir uzaktan eğitim programını akredite etmediğini ve yalnızca az sayıda programın çalışma alanlarıyla uyumlu olduğunu ortaya konmuştur. Şenol ve diğ. 2016-2020 yılları arasında Akdeniz Üniversitesi bünyesinde bulunan Eğitimde ve Öğretimde Mükemmellik Araştırma ve Uygulama Merkezi koordinasyonu ile yürütülen eğitim iyileştirme çalışmalarını değerlendirmiştir [5]. Logic model kullanılan çalışmada, diğer üniversitelere kalite kültürünün yaygınlaşması açısından kurumsal düzeyde olsa da eğitimde mükemmellik merkezlerinin oluşturulması önerilmiştir. Taştan ve Yılmaz, kalite yönetiminin getirdiği kurumsal değişimi anlayabilmek ve kalite yönetiminin yükseköğretimde nasıl tanımlanıp uygulandığını keşfedebilmek için Yükseköğretimde Kalite Yönetimi Uyma Ölçeği geliştirmiştir [6]. Ölçek analizi, kalite yönetimini erken benimseyen kurumların daha yüksek derecede normatifliğe sahip olduğunu, yani kalite güvencesi bağlamında daha gelişmiş olduklarını ortaya koymuştur. Yanmaz Arpacı ve diğ. yükseköğretim KGS'lere odaklanarak bir devlet üniversitesinde kalite yönetim sistemi uygulamalarını sunmuştur [7]. Çalışma kapsamında farklı kalite yönetim sistemi araçları uygulama örnekleri ile tanımlanmıştır. Kalite yönetimi uygulamaları gerçekleştirilen kurumda PUKÖ döngüsünün, "Planla-Uygula" aşamalarında başarılı olduğu görülmüştür. "Kontrol et – Önlem al" aşamalarınınsa kanıtlarıyla birlikte sunulması halinde kalite yönetimini daha sistematik ve sürdürülebilir hale dönüştüreceği belirtilmiştir. Hamutoğlu ve diğ. YÖKAK'ın 2016, 2017 ve 2018 yıllarında değerlendirme ve kalite güvencesi kapsamında yayınladığı durum raporlarının tematik olarak incelenmesini gerçekleştirmiş ve elde edilen sonuçları İngiltere'nin KGS ile karşılaştırmıştır [8]. Bu amaçla 77 farklı kaynak, içerik analizi yönteminden yararlanılarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda Türkiye'deki yükseköğretim kurumlarına yönelik iş birliği ile diploma ve mikro kredilendirme konularında öneriler sunulmuştur. Taner yeni kurulan bir devlet üniversitesinde KGS yapılandırılmasına odaklanmıştır [9]. Benzer durumdaki yükseköğretim kurumları için rehber niteliğinde olan çalışmada, 11 farklı kalite güvencesi aracı kurgulaması önerilmiştir. Çalışma sonucunda söz konusu kurumların her alanda yasal mevzuata uygun süreç yönetmelerinin, stratejik yönetim yaklaşımını benimsemelerinin ve ISO 9001:2015 Kalite Yönetim Sistemi yaklaşımına uygun olarak süreçlerini tasarlamalarının kalite bilincini ve kültürünü yaygınlaştıracağı belirtilmiştir.

Yükseköğretim kurumlarında kalite güvencesi kavramı stratejik yönetim ve paydaş memnuniyeti gibi kavramlarla yakından ilişkilidir. Bu kavramlar arasındaki ilişkiyi anlamak, kalite güvencesinin etkin bir şekilde yürütülmesini sağlamak için önemlidir. Stratejik yönetim ve paydaş memnuniyeti konularının, bilimsel literatürde çok sayıda çalışmaya konu olduğu görülmektedir. Çalışma kapsamında yükseköğretim kurumlarında söz konusu konularda gerçekleştirilen önemli bilimsel çalışmalar incelenerek analiz edilmiştir. Yükseköğretimde stratejik yönetim perspektifinin geliştirilmesi konusunu Gökbel ve diğ. değerleri dönüştürme bağlamında irdelemiştir [10]. Çalışmada Türkiye'nin önde gelen devlet üniversitelerinin stratejik planlarını ve Selçuk Üniversitesi tarafından yürütülen "Arama Konferansı" sonuçlarını analiz eden "Selçuk Üniversitesi Stratejik Yol Haritası Belirleme" örneği üzerine karşılaştırmalı bir analiz sunulmuştur. Ayrıca, üniversitelerin güçlü ve zayıf yönlerinin yanı sıra tehdit ve fırsat algıları da tanımlanmıştır. Bu kapsamda önceliklerin ve stratejik politikaların belirlenmesinde disiplinler arası çalışmaların, stratejik ortaklıkların, araştırma faaliyetlerinin, lisansüstü eğitimin, paydaşlarla iş birliğinin ve uluslararasılaşmanın önemi vurgulanmıştır. Çalışmada, KGS faaliyetlerinin tamamlanması ve etkili stratejik planlama ve yönetim için benzersiz bir "Stratejik Yönlendirme Komitesi" kurulması önerilmiştir. Cevher ve Yüksel, Türkiye'deki devlet üniversitelerindeki eğitimin mevcut durumunu değerlendirmiştir [11]. Yükseköğretim stratejisi çerçevesinde güçlü ve zayıf yönler ile fırsatların ve tehditlerin (GZFT) tespitine odaklanılan çalışmada, Türkiye'nin yükseköğretim stratejisi çerçevesinde üniversitelerin mevcut durumu tartışılarak önerilerde bulunulmuştur. Kapucugil ve diğ., öğrencilerin aldıkları hizmetlerden genel memnuniyet düzeylerini ölçen ve ölçüm sonuçlarını kurum yönetimine yapılandırılmış bir şekilde sunan bir bilgi sistemi tasarımı geliştirmiştir [12]. Sistem ile gerekli alanların iyileştirilmesine yönelik kararlar alma, eğitim kalitesini ve öğrenci memnuniyetini artıracak politika ve hedeflerin belirlenmesi ve bu hedeflere ulaşmak için sistematik performans değerlendirme fırsatlarının sağlanması bakımından bir devlet üniversitesinin stratejik planına girdi oluşturma amaçlanmıştır. Özcan ve diğ. değişen koşulları ve yükseköğretim kurumlarına artan talebi göz önünde bulundurarak Türk, Avrupa ve Amerikan yükseköğretim sistemlerindeki kurumsal kalite değerlendirme süreçlerini analiz ederek karşılaştırmıştır [13]. Çalışmada değerlendirme sistemleri, boyutlar, yaklaşımlar ve ilgili kişilerdeki benzerlikler ve farklılıklar vurgulanarak, Türk yükseköğretim sisteminde sistematik ve derinlemesine kalite değerlendirme süreçlerine duyulan ihtiyaç ön plana çıkmıştır. Önen ve Uysal stratejik planlamanın bileşenleri olan misyon, vizyon, temel değerler ve GZFT verilerini nitel araştırma yöntemine dayalı içerik analizi kullanılarak açıklamıştır [14]. Yapılan analiz sonucunda ilgili üniversitelerin yükseköğretim esasları içinde kendi coğrafik konumuna ve ihtiyaçlarına göre kendi misyon, vizyon ve temel değerlerini oluşturdukları, GZFT analizi ile hem iç faktörleri hem de dış faktörleri açık bir şekilde değerlendirdikleri sonucuna erişilmiştir. Tarakcıoğlu ve diğ. dünya çapında yükseköğretim kurumları tarafından yayınlanan entegre raporların içerik unsurlarına, sermaye bileşenlerine, çalışma modellerine, paydaş analizine, değer yaratma modellerine ve entegre raporlamaya yönelik farklı yaklaşımlara odaklanarak karşılaştırmalı bir analiz gerçekleştirmiştir [15]. Söz konusu raporların Uluslararası Entegre Raporlama Konseyi tarafından belirtilen ilkelere uygunluğu incelenen ve içerik unsurlarının eğilimleri ile kapsamı araştırılan çalışma ile entegre raporlamanın yükseköğretim kurumları için geçerli olduğunu ve sektördeki sürdürülebilirlik faaliyetlerine, kalite çalışmalarına ve kurumsal sosyal sorumluluğa katkıda bulunabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Çalışmada ayrıca entegre raporlar yayınlayan sınırlı sayıda yükseköğretim kurumlarının ve entegre raporlamanın gelecekte daha fazla analiz ve uygulanması ihtiyacı olacağı vurgulanmıştır.

Uğurlu yükseköğretim kurumları arasında öğrenci ve eğitmen değişim programı olan Farabi Değişim Programı'na odaklanmıştır [16]. Öğrenci değişim programlarının üniversiteler ve öğretmen yetiştirme kurumları üzerindeki etkisi, sosyal ağ analizi kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışma çerçevesinde öğrenci değişimi açısından üniversiteler

arasındaki ilişkiler de analiz edilmiştir. 18 üniversiteye dair veriler kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada, eğitim fakülteleri arasındaki ağların nispeten daha zayıf olduğu ve bu ekosistem içerisinde birbirinden kopuk ve izole aktörlerin sayısının fazla olmasının öğretmen yetiştiren kurumlar ile eğitim fakülteleri arasındaki bağlantıların güçlendirilmesinin gerekliliğini gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Paydaşlara ve paydaş memnuniyetine yönelik gerçekleştirilen çalışmalar irdelendiğinde, Olgun ve Özdemir, eğitim hizmetlerinde kalite faktörlerini belirleme ve memnuniyetsizlik kaynaklarını iyileştirme gerekliliğine odaklanarak önem-memnuniyet modeli ile kaliteyi etkileyen faktörleri belirlemiş ve iyileştirme önceliklerini Taguchi'nin istatistiksel deney tasarımı yöntemi ile saptamıştır [17]. Süleyman Demirel Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü'nde yürütülen bu çalışmada, öğrencilere iki aşamalı anket uygulanarak eğitim kalitesiyle ilgili kritik dört faktör tespit edilmiştir. Taguchi metoduyla deneme sayısı azaltılarak optimize edilen analiz, eğitimde hizmet kalitesini artırmak adına öncelikli faktörlerin belirlenmesine önemli katkılar sunmuş ve yükseköğretimde kalite güvencesi sistemlerinde sistematik iyileştirme yaklaşımlarının önemini vurgulamıştır. Damar ve diğ. Bologna Sürecinin yükseköğretimdeki önemine dikkat çekerek bir devlet üniversitesinde eğitim kalitesini değerlendirmek ve iyileştirmek için geliştirilen metodolojileri değerlendirmektedir [18]. Çalışmaların gerçekleştirildiği yükseköğretim kurumunda, geri bildirim toplamak ve öğretim ve öğrenmeyi geliştirmek için Öğrenci Ders Geri Bildirim Sistemi gibi yenilikçi farklı sistemler geliştirilmiştir. Geliştirilen sistemin diğer mevcut sistemlerle entegrasyonu, derslerin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine izin vermekle beraber kanıta dayalı karar vermede ve sürekli iyileştirmede önemli avantajlar sağladığı belirtilmiştir. Sürdürülebilir mantıkla çalışan bu yaklaşımın, bir yaşam KGS'nin kurulmasında önemli kilometre taşları olarak kabul edildiği görülmektedir. Ömürgönülşen ve diğ. müşteri ihtiyaçlarını belirleyerek ve önceliklendirerek bir lisans dersinin kalitesini artırmak için kano modelini ve kalite fonksiyon göçerimini kullanmıştır [19]. Bu kapsamda en önemli öğrenci ve teknik gereksinimleri içeren odaklanmış bir kalite evi yaratılması amaçlanmış ve elde edilen sonuçlar, öne çıkan teknik gereksinimlerin bütçe/fon, derse kayıtlı öğrenci sayısı, öğretim elemanının iş yükü, fabrika gezisi, iyi iletişim/empati, öğretim elemanının niteliği ve öğretim yeterliliği olduğunu göstermiştir. Ayrıca teknik geziler ve paneller gibi etkinliklerin öğrenci memnuniyeti üzerinde olumlu etkileri olduğu da belirtilmiştir. Tekindal ve diğ. iyi yönetişimin gerektirdiği sürekli iyileştirme ilkesini benimseyen İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi'nde akademik ve idari personel memnuniyetini ölçmek için iki ayrı ölçek geliştirilmesine odaklanmaktadır [20]. Ölçek öğelerinin açıklayıcı faktör analizi kullanılarak belirlenen boyutlarla uyumlarının kontrolü sağlanmıştır. Analiz sonuçları, ölçeklerin hem akademik hem de idari personel için memnuniyet düzeyini ölçebildiğini göstermiştir.

Bu çalışmada, literatürde önerilen farklı kalite yönetimi ve paydaş memnuniyeti ölçüm yaklaşımları dikkate alınarak, gelişmekte olan bir devlet üniversitesinde KGS yapılandırılması için stratejik yönetim temelli ve mühendislik disipliniyle desteklenen özgün bir model önerilmektedir. Literatürde, kalite güvencesi sistemlerine yönelik birçok çalışma bulunmasına karşın, yeni kurulan ve gelişmekte olan devlet üniversitelerine özel bir model geliştirilmediği tespit edilmiştir. Literatürde kalite güvencesi sistemleri üzerine yapılan araştırmalar arasında, paydaş memnuniyetine dayalı analitik yöntemlerin (faktör analizi ve regresyon modeli) stratejik yönetim ile bütünleşik olarak kullanıldığı sürdürülebilir bir model sunan çalışmalara sınırlı sayıda rastlanmaktadır. Çalışmamız, bu eksikliği gidermek amacıyla, paydaş memnuniyeti odaklı sistematik bir yaklaşım benimseyerek kalite güvencesini stratejik planlama ve uygulama süreçleriyle bütünleştiren bir yönetim modeli sunmaktadır. Önerilen model, yükseköğretim kurumunun eğitim-öğretim, araştırma-geliştirme, toplumsal katkı ve idari süreçlerini bütüncül bir çerçevede ele alan ve kalite güvencesini sürdürülebilir kılmayı amaçlayan sistematik bir yapıya sahiptir. Modelin dayandığı temel unsurlar arasında endüstri mühendisliği disipliniyle ilişkili analitik yaklaşımlar, PUKÖ döngüsü ile sürekli iyileştirme mekanizması, veriye dayalı karar alma süreçleri ve faktör analizi ile desteklenen paydaş memnuniyeti değerlendirme metodolojisi yer almaktadır. Bu yönüyle çalışma, yalnızca yönetişim tabanlı bir kalite yönetim modeli değil, aynı zamanda mühendislik disiplininin analitik ve sistematik yaklaşımlarını yükseköğretim yönetimine entegre eden özgün bir modeldir. Ayrıca, çalışmada benzer araştırmalardan farklı olarak anket verilerinin analizi için faktör analizi ve regresyon modeli kullanılmış, paydaş memnuniyetinin kalite güvencesi sistemine etkisini istatistiksel olarak test eden bir yöntem izlenmiştir. Bu nedenle, çalışmamız önerdiği metodolojiyle literatürde mevcut olan boşluğu doldurmayı hedeflemektedir. Bu yöntem sayesinde, kurumun paydaş memnuniyetini sürdürülebilir kılmak için hangi alanlara öncelik vermesi gerektiği bilimsel bir çerçevede belirlenmiş olacaktır. Daha önce kalite güvencesi alanında önerilen modeller incelendiğinde, bu bileşenleri içeren, özellikle yeni kurulan üniversitelere özgü sistematik bir model sunan herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu doğrultuda, çalışma kalite güvencesi modellerine mühendislik prensipleri ve stratejik yönetim perspektifi ekleyerek hem akademik hem de pratik katkılar sunmaktadır.

Çalışmanın devam eden bölümünde önerilen kalite güvencesi modeli sunulmuştur. Üçüncü bölümde paydaş memnuniyetine yönelik geliştirilen anket sistematiği detaylı olarak aktarılırken, dördüncü bölümde bu anketlere yönelik gerçekleştirilen analiz çalışmalarına yer verilmiştir. Beşinci ve son bölümde ise çalışma sonuçlandırılarak elde edilen bulgular paylaşılmıştır.

2 Stratejik yönetim tabanlı yükseköğretim kalite güvencesi modeli

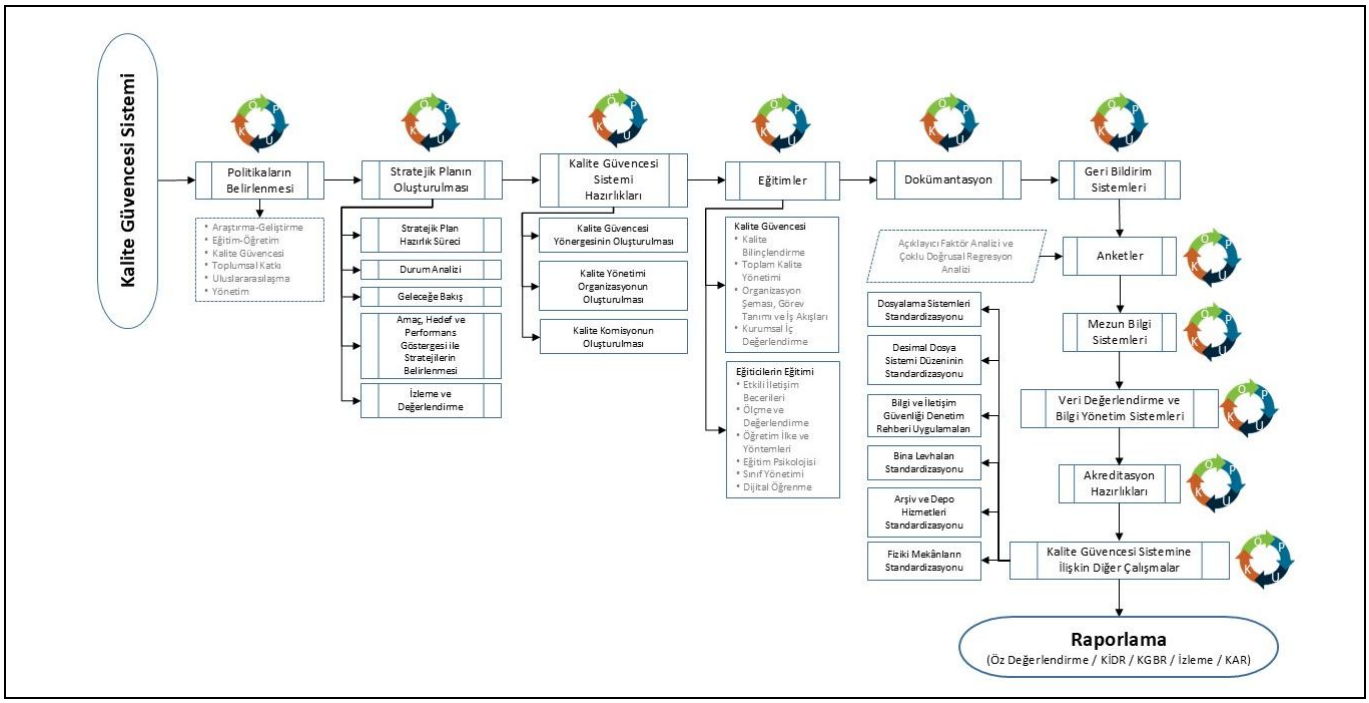
Yeni kurulan ve gelişmekte olan üniversitelerde KGS, kurumun kuruluşundan itibaren öncelikli olarak ele alınmalıdır. KGS, üniversitenin eğitim-öğretim, araştırma-geliştirme, toplumsal katkı ve yönetim faaliyetlerinin kalitesini sürekli iyileştirmek ve bu iyileştirmenin sürdürülebilirliğini sağlamak amacıyla planlanan ve yürütülen bir süreçtir. Sistematik bir yaklaşımla uygulandığında, KGS zamanla kurum kültürünün ayrılmaz bir parçası haline gelir ve kurumun amaçlarına ve hedeflerine uyumlu, özgün bir yapıya bürünerek kurumsal performans yönetim sistemine dönüşür [21].

Bu noktada Türkiye Yükseköğretim Ekosisteminde kurumların KGS'yi geliştirmek ve değerlendirmelerde bulunmak üzere 2015 yılında Yükseköğretim Kalite Kurulu (YÖKAK) kurulmuştur. YÖKAK tarafından sunulan Yükseköğretim Kalite Güvencesi Yönetmeliğinde de PUKÖ esaslı bir sistemi öngören ve Stratejik Planla etkileşim içinde bulunan bir yönetişim yapısı, yükseköğretim kurumlarına önerilmektedir. Dolayısıyla çalışmada önerilen model gerek misyon, vizyon ile amaç ve

hedeflerle etkileşim, gerekse izleme ve değerlendirme süreçlerinin mevcut olması bakımından stratejik planla sürekli bir ilişki içerisindedir. Bütüncül bir bakış açısını gerektiren bu husus, söz konusu kuruluşlarda uygulanacak KGS modelinin stratejik yönetim esaslı olmasını kaçınılmaz kılmaktadır. Şekil 2'de önerilen Stratejik Yönetim Tabanlı Yükseköğretim Kalite Güvencesi Modeline dair akış şeması sunulmuş ve devam eden alt bölümlerde bu modelin uygulama adımları detaylı olarak açıklanmıştır. Şekil 2'de sunulan Stratejik Yönetim Tabanlı Yükseköğretim Kalite Güvencesi Modeli, kalite süreçlerinin sistematik ve sürdürülebilir bir yapıya kavuşmasını sağlamak için tasarlanmıştır. PUKÖ döngüsü, modelin her aşamasında temel yönetim felsefesi olarak benimsenmiştir ve görselde döngülerle temsil edilmiştir. Modelin farklı aşamalarında kullanılan yöntemler (PUKÖ döngüsü, açıklayıcı faktör analizi, regresyon analizi) ilgili süreçler kapsamında uygulanmıştır. Model, kalite yönetim süreçlerinin stratejik planlama, süreç yönetimi ve geri bildirim sistemleri ile entegrasyonunu esas alarak, kalite güvencesinin kurum genelinde etkin bir şekilde yürütülmesini hedeflemektedir. Bu kapsamda, modelde yer alan her bir süreç, yükseköğretim kurumlarının kalite yönetimi çerçevesinde uygulayabileceği somut adımlar içermektedir. Önerilen modelin uygulanabilirliğini artırmak amacıyla, yükseköğretim kurumlarında her bir sürecin nasıl yürütülebileceğine dair örnek uygulamalar sunulmuştur. Örneğin, stratejik plan oluşturma sürecinde veri odaklı analizler kullanılarak kalite hedefleri belirlenmekte ve performans göstergeleri oluşturulmaktadır. Benzer şekilde, kalite yönetimi organizasyonu yapılandırılarak süreçlerin sistematik hale getirilmesi sağlanmaktadır. Bu süreçlerin yükseköğretim kurumlarına uyarlanabilirliği, Şekil 2'de özetlenen modelin temel bileşenleriyle takip eden altbölümlerde açıklanmaktadır.

Modelin yükseköğretim kurumlarında uygulanması, kalite güvencesi süreçlerinde sürdürülebilirliği artırarak stratejik yönetim ve kalite politikalarının entegrasyonunu sağlamaktadır. Özellikle kalite değerlendirme süreçlerinde sürekli geri bildirim mekanizmalarının oluşturulması, paydaş memnuniyeti analizleriyle desteklenerek üniversitelerin kalite yönetim performanslarını ölçümlemelerine ve iyileştirmelerine olanak tanımaktadır. Bu model, yükseköğretim kurumlarının iç kalite güvencesi süreçlerinde sistematik bir yaklaşım benimsemelerini teşvik etmektedir.

Önerilen kalite güvencesi modeli, mühendislik disiplininde yaygın olarak kullanılan sistematik analiz, veri odaklı karar verme, süreç yönetimi ve sürekli iyileştirme prensipleriyle tasarlanmıştır. Modelin temelinde, süreçlerin düzenli olarak gözden geçirilmesini ve iyileştirilmesini sağlayan PUKÖ döngüsü yer almaktadır. Bu çerçevede, kalite güvencesi sisteminin etkinliği ve sürdürülebilirliği, veriye dayalı analizlerle desteklenen bir süreç yönetimi anlayışıyla ele alınmıştır. Model kapsamında, paydaş memnuniyetini değerlendirmek amacıyla faktör analizi ve regresyon modellemesi kullanılmış ve kalite algısını etkileyen temel değişkenler tespit edilmiştir. Kurum içi kalite yönetimi süreçlerinde geri bildirim mekanizmalarından elde edilen verilerin sistematik analizlere tabi tutularak karar alma süreçlerinin bilimsel yöntemlerle desteklenmesi öngörülmüştür. Stratejik yönetim sürecinde, mühendislikte yaygın olarak kullanılan süreç haritalama ve veri tabanlı performans ölçüm yöntemleri ile kurumsal stratejilerin tespiti, ölçülebilir ve takip edilebilir olması sağlanmıştır. Sürekli iyileştirme ve geri bildirim mekanizmaları, önerilen modelin temel bileşenlerinden biri olarak ele alınmıştır. Anket verilerinin ve kalite göstergelerinin düzenli aralıklarla analiz edilerek modelin güncellenmesi ve adaptasyonu sağlanması gerekmektedir. Bu bağlamda, akreditasyon süreci ve kalite yönetim sistemleri, endüstri mühendisliği disiplini içinde yer alan kalite güvence yaklaşımlarından esinlenerek kurgulanmıştır.



Şekil 2. Stratejik yönetim tabanlı yükseköğretim kalite güvencesi modeli akış şeması.

Figure 2. Strategic management based higher education quality assurance model flow chart.

Mühendislik disiplininin sunduğu sistematik yöntemler, kalite güvencesi süreçlerinin yalnızca teorik bir çerçevede değil, pratik olarak uygulanabilir bir yapı içinde ele alınmasını sağlamaktadır. Böylece, önerilen model sadece istatistiksel analizlere dayalı bir değerlendirme sunmakla kalmayıp süreç yönetimi, veri analizi ve optimizasyon gibi mühendislik yöntemlerini de içeren bütüncül bir sistem olarak tasarlanmıştır.

2.1 Politikaların belirlenmesi

Politikalar, yükseköğretim kurumları için ilgili fonksiyonların ne anlama geldiğini, hangi mekanizmaları içerdiğini, hangi süreçlerden oluştuğunu ve kimler tarafından gerçekleştirildiğini kısaca özetleyen, kapsayıcı ve katılımcı bir yaklaşımla oluşturulmuş metinlerdir. Politikaların oluşturulması süreci kurum üst yönetimi sorumluluğunda gerçekleştirilmeli ve mutlaka paydaş görüşleri alınmalıdır. Mühendislikte sıkça kullanılan sistematik analiz ve süreç yönetimi prensipleriyle uyumlu olarak, politika geliştirme süreci; ihtiyaç analizi, veri toplama ve paydaş görüşlerinin değerlendirilmesi aşamalarını içerecek şekilde veriye dayalı bir yaklaşımla yapılandırılmalıdır. Bu yapı, tüm süreçlerin ölçülebilir, izlenebilir ve iyileştirilebilir olmasını sağlayacaktır. Bu bağlamda, özellikle performans kriterlerinin belirlenmesinde veri odaklı bir yaklaşım benimsenmelidir. Ayrıca, politikalar kurumsal yönetimin bir gerekliliği olduğu gibi stratejik plan hazırlanması sürecinde de strateji ve hedeflerin oluşturulmasında rehber olarak kullanılabilir. Diğer taraftan stratejik plan kapsamında olan stratejik amaçlar, hedefler ve bunların altında yer alan faaliyetler ile performans göstergeleri İzleme ve Değerlendirme faaliyetlerinin de kapsamını politikalar oluşturmaktadır [22].

Bir yükseköğretim kurumunda bulunması gerekli görülen temel politikalar ile bunların içerik özetleri şu şekildedir:

Araştırma – Geliştirme ve İnovasyon Politikası: Yükseköğretim kurumları, bilgi üretimi, teknolojik ilerleme ve inovasyon süreçleri aracılığıyla toplumsal kalkınmaya katkıda bulunmak için disiplinlerarası, yenilikçilik ve girişimcilik odaklı, iş birliklerine önem veren politikalar benimsemelidir. Bu politikalar, araştırma faaliyetlerini teşvik etmeyi, bilimsel çalışmaları desteklemeyi, teknolojik gelişmeleri takip etmeyi, inovasyon süreçlerini yönetmeyi ve akademik kadroların niteliğini artırmayı hedefleyen stratejiler içermelidir. Eğitim-öğretimin odağına araştırma ve geliştirme faaliyetlerini alan, toplumsal katkıyı nitelikli araştırma-geliştirmenin bir çıktısı olarak gören, araştırma-geliştirme politikasını eğitim-öğretim, toplumsal katkı ve dijitalleşme gibi politikalarına entegre edebilen ve inovasyon geliştirme potansiyeline sahip yükseköğretim kurumlarının araştırma performansını geliştirici stratejiler bu politikayla belirlenmelidir.

Eğitim-Öğretim Politikası: Yükseköğretim kurumlarının temel faaliyet alanı olan eğitim-öğretim politikaları, öğrencilerin bilgi, beceri ve yetkinliklerini geliştirmeye odaklanmalıdır. Öğrenci merkezli bir yaklaşım benimseyen bu politikalar, öğrenme-öğretme süreçlerini etkili bir şekilde yönetmeyi, eğitim programlarını güncellemeyi, öğretim yöntemlerini geliştirmeyi, öğrenci başarısını izlemeyi ve destekleyici öğrenme ortamları tasarlamayı hedefleyen stratejiler belirlemelidir.

Kalite Güvencesi Politikası: Kalite yönetim sürecinde kilit rol oynayan kalite güvencesi politikası, KGS ile ilgili faaliyetleri yönlendirir. Kurumların kalite kontrol ve kalite güvencesi süreçlerini belirlemesi, kalite standartlarını ve kalite yönetim sistemi belgelerinin gerekliliklerini yönetmesi, kalite değerlendirme süreçlerinin tasarlanması, PUKÖ felsefesi ile sürekli iyileştirme faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi, paydaş katılımını öngörmesi ve kalite güvencesi ile ilgili tüm faaliyetlerin takip edilmesi için stratejiler belirlemelidir.

Toplumsal Katkı Politikası: Yükseköğretim kurumları toplumsal katkı süreçlerini dört ana faaliyet etrafında yönetmelidir: Yaşam boyu öğrenme faaliyetleri, nitelikli eğitim-öğretim ve Ar-Ge'den elde edilen bilginin (know-how) çıktıya dönüştürülmesi (şirket kurulumları ve danışmanlık hizmetleri), sosyal sorumluluk projeleri ve toplumsal dayanışma faaliyetleri. Toplumsal katkı politikaları, toplumun ihtiyaçlarına cevap verecek ve toplumla iş birliğini güçlendirecek stratejiler içermelidir. Bu sayede, yükseköğretim kurumları toplumun sosyal, kültürel ve ekonomik gelişimine daha etkin bir şekilde katkıda bulunabilirler.

Uluslararasılaşma Politikası: Küreselleşen dünyada rekabet edebilmek için yükseköğretim kurumlarının uluslararasılaşması büyük önem taşımaktadır. Uluslararasılaşma politikaları, kurumların uluslararası alanda tanınırlığını artırmayı, öğrenci ve akademik personel değişim programları geliştirmeyi, uluslararası iş birliği projeleri yürütmeyi ve yabancı öğrenci sayısını artırmayı hedefleyen stratejiler içermelidir.

Yönetim Politikası: Yönetim politikası, yükseköğretim kurumlarının idari ve akademik yönetimini düzenleyen temel bir politikadır. Kurumun yönetim yapısını, yönetim kadrosunun görev ve sorumluluklarını, yönetim süreçlerini ve karar verme mekanizmalarını kapsayan bu politika, katılımcı bir yönetim anlayışıyla kaliteyi kurum kültürü haline getirmeyi, sürekli iyileştirmeyi ve paydaş memnuniyetini ön planda tutmayı amaçlamalıdır.

Belirtilen bu 6 politikaya ek olarak, bazı yükseköğretim kurumlarında İnsan Kaynakları, Mali ve Bilgi Yönetimi Politikası gibi politikaların da yer aldığı görülmektedir. Politika metinlerinin yazımı süreci metinlere dair paydaş görüşlerinin alınması, kurum yönetimi onayı ve internet sayfasında ilan edilerek tüm paydaşlara duyurulması aşamaları oluşturularak tamamlanmaktadır.

2.2 Stratejik planın oluşturulması

Günümüzde yükseköğretim kurumlarının başarısı, büyük ölçüde stratejik yönetim becerilerine bağlıdır. Stratejik yönetim modeli, üniversitelerin misyon ve vizyonlarını belirlemelerine, stratejik amaç ve hedefler doğrultusunda planlı faaliyetler yürütmelerine ve kaynaklarını etkin bir şekilde kullanmalarına olanak tanır [21].

Türkiye'de kamu idareleri için stratejik plan hazırlama zorunluluğu, 2003 yılında 5018 sayılı Kamu Mali Yönetimi ve Kontrol Kanunu ile getirilmiştir. Bu yasal düzenlemeyle, yükseköğretim kurumlarının da stratejik yönetim yaklaşımını benimsemesi sağlanmıştır. Ayrıca, T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı tarafından sunulan "Üniversiteler İçin Stratejik Planlama Rehberi", kurumlara 5 yıllık stratejik planlarını hazırlama konusunda yol göstermektedir. Bu rehber, yükseköğretim kurumlarının stratejik yönetim süreçlerini daha sistematik ve etkili bir şekilde yürütmelerine yardımcı olmaktadır.

Yükseköğretim kurumlarında Stratejik Plan Hazırlama Sürecinden yetkili ve sorumlu birim Strateji Geliştirme Daire

Başkanlığı olarak belirlenmiştir. Söz konusu rehberde hazırlık süreci, durum analizi, geleceğe bakış, amaç-hedef ve performans göstergeleri ile stratejilerin belirlenmesi ve izleme ve değerlendirme olmak üzere Stratejik Plan hazırlama süreci 5 ana başlıkta belirlenmiştir. Ayrıca, gelecek dönemde üniversiteler arasında farklılaşma eğiliminin, kapsam ve derinliğinin artmasına yol açacak temel nedenler; "Üniversite sayısında artışın devam etmesi", "Yükseköğretim sektöründe çeşitliliğin artması", "Üniversitelerin uluslararasılaşma eğiliminin artması", "üniversitelerin maddi kaynak ihtiyacının artması", "üniversitelerin yerel, bölgesel ve ulusal rekabet gücü elde etme veya kalkınma aracı olarak değerlendirilmesi" ve "üretilen bilginin ticarileştirildiği üçüncü kuşak (girişimci) üniversitelerin ortaya çıkması" şeklinde öngörüldüğü de Rehberde belirtilmektedir. Stratejik plan performans programı, izleme ve değerlendirme süreçlerini içeren faaliyet raporları ile ilgili süreçlerden oluşan stratejik yönetim döngüsü bir bütünlük oluşturacak şekilde tasarlanmakta ve uygulanmaktadır [21].

Stratejik planlama süreci, mühendislik disiplininde yaygın olarak kullanılan sistematik planlama ve veri analizi yöntemleriyle uyumlu olarak tasarlanmalıdır. Mühendislikte kullanılan sistematik analiz teknikleri ve veri odaklı karar alma süreçleri, stratejik planlama aşamasında da tercih edilmeli, kurumsal hedeflerin gerçekçi ve ulaşılabilir olmasına özen gösterilmelidir. Bu doğrultuda, veri toplama, analiz ve raporlama aşamaları detaylandırılarak, stratejik planın etkili bir şekilde uygulanabilirliğini artırmaya yönelik mühendislik tabanlı bir çerçeve geliştirilmelidir.

2.3 Kalite güvencesi sistemi (KGS) hazırlıkları

KGS, bir yükseköğretim kurumunun ürün ve hizmetlerinin kalitesini sürekli olarak artırmak ve paydaş memnuniyetini sağlamak için uygulanan kapsamlı bir yönetim sistemidir. KGS, iç ve dış kalite güvencesi olmak üzere iki temel bileşenden oluşur. İç kalite güvencesi sistemi, kurumun kendi bünyesinde oluşturduğu mekanizmaları ifade eder. Bu mekanizmalar arasında kalite güvencesi birimleri, kalite komisyonları, kalite yönetim sistemi, eğitim ve öğretim gibi farklı konulardaki kalite alt komisyonları ve öğrenci değerlendirme sistemleri yer alır. Dış kalite güvencesi sistemi ise, ulusal ve uluslararası akreditasyon kuruluşları tarafından sağlanan mekanizmalardır. YÖKAK tarafından yürütülen kurumsal akreditasyon ve uluslararası akreditasyon kuruluşlarının denetimleri, dış kalite güvencesi sisteminin temel unsurlarıdır.

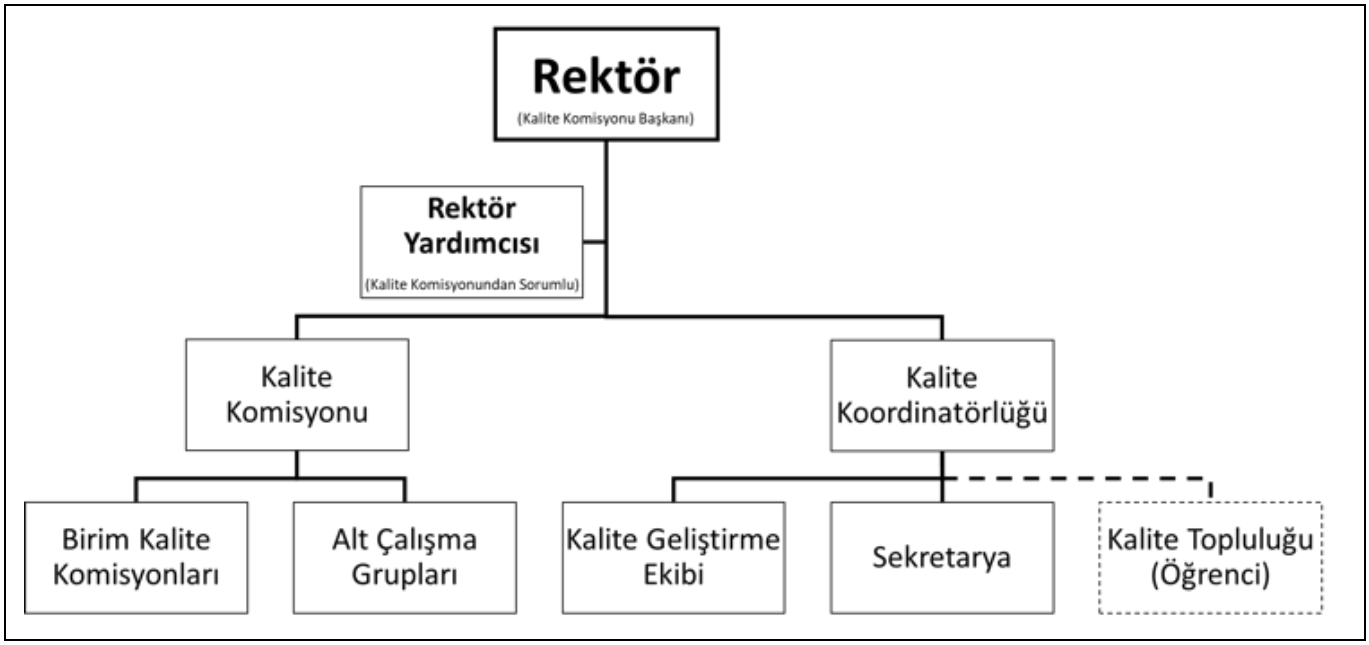
Yükseköğretim kurumları, akademik faaliyetlerinin kalitesini sürekli artırmak amacıyla KGS'yi etkin bir şekilde uygulamalıdır. Özellikle yeni kurulan ve gelişmekte olan yükseköğretim kurumları, KGS yapılandırma çalışmalarına büyük önem vermelidir. Bu çalışmalar, kurumun politikaları, misyonu ve vizyonu doğrultusunda belirlenen hedefler ve performans göstergeleri çerçevesinde yürütülmelidir. KGS'nin kurumun mevcut durumuna ve ihtiyaçlarına uygun olarak tasarlanması için kapsamlı bir durum analizi yapılmalı, sorunlar tespit edilerek çözüm önerileri geliştirilmelidir.

Mühendislik disiplini çerçevesinde yapılandırılan KGS, sistemin titizlikle tasarlanması, standart hale getirilmesi ve iyileştirilmesi için sistematik ve veri odaklı bir yaklaşım benimser. Bu süreçte, mühendislik prensipleri doğrultusunda, KGS'nin standartlara uygun olarak yapılandırılması, süreçlerin ölçülebilirliği ve performans optimizasyonu öncelikli hedefler arasında yer almalıdır. Mühendislikte yaygın olarak kullanılan sistematik tasarım, süreç iyileştirme ve optimizasyon yöntemleri, KGS'nin sürdürülebilir bir yapıya kavuşması ve etkinliğinin arttırılmasında önemli katkılar sunacaktır. Örneğin; süreç haritalama, hata türü ve etkileri analizi (FMEA), sürekli iyileştirme (Kaizen) gibi mühendislik araçları, KGS'nin uygulamalarında kaliteyi sağlama ve sürekli iyileştirme süreçlerinde kullanılabilir. Bu yaklaşımla hazırlanan KGS, yalnızca bir yönetim aracı değil, aynı zamanda mühendislik yöntemleriyle desteklenen bir yapı olarak, kurumun kalite hedeflerine ulaşmasında etkin bir araç olarak işlev görecektir. Bu sistem, yükseköğretim kurumlarında süreçlerin kontrol edilebilir, izlenebilir ve optimize edilebilir olmasını sağlayarak kalite güvencesi hedeflerine ulaşılmasını destekler.

KGS hazırlıkları, öncelikle kalite yönetim sistemlerinin tanımı ve gerekliliğinin tüm paydaşlar tarafından anlaşılmasını sağlamalıdır. Kurum genelinde bir kalite yönetim sistemi oluşturulmalı, sürekli iyileştirme süreci başlatılmalı ve tüm birimler bu sürece aktif olarak dahil edilmelidir. Akademik programlar ve hizmetlerle ilgili standartlar belirlenmeli, kalite güvencesi mekanizmaları oluşturulmalı ve kurum içi iletişim ve koordinasyon güçlendirilmelidir. Tüm birimler arasında sinerji oluşturularak, herkesin KGS'ye katkıda bulunması teşvik edilmelidir. Bu noktada, kalite yönetimi eğitimleri ve bilgilendirme faaliyetleri, kalite güvencesi bilincinin ve kültürünün kurum genelinde yaygınlaşması açısından kritik öneme sahiptir [21].

KGS'lerini yapılandırmak isteyen yükseköğretim kurumlarında bazı ön hazırlıkların yapılması gereklidir. Bu ön hazırlıklar: "Kalite Güvencesi Yönergesinin Oluşturulması", "Kalite Yönetimi Organizasyonun Oluşturulması" ve "Kalite Komisyonun Oluşturulması" faaliyetlerinden oluşmaktadır.

Kalite Güvencesi Yönergesi, KGS'nin kurulmasında temel ve kritik bir adımdır. Bu yönerge, sistemin yasal altyapısını oluşturarak Kalite Komisyonu'nun amaçlarını, görevlerini, yetkilerini ve sorumluluklarını tanımlar. Ayrıca, eğitim-öğretim, araştırma-geliştirme, toplumsal katkı faaliyetleri ve idari hizmetlerin iç ve dış kalite güvencesi, akreditasyon süreçleri ve komisyonun çalışma şekli gibi konuları kapsamalıdır. Kalite Koordinatörlüğü ve Birim Kalite Komisyonlarının görev ve çalışmalarına ilişkin hükümler de bu yönergede yer almalıdır [9]. Kalite Yönetimi Organizasyonun ve Kalite Komisyonunun oluşturulması, kalite güvencesi sürecinde kritik bir adımdır. Yükseköğretim Kalite Güvencesi ve Yükseköğretim Kalite Kurulu Yönetmeliği, bu konuda genel bir çerçeve sunsa da yeni kurulan üniversitelerin genç ve dinamik yapısı göz önüne alındığında, birim yöneticileri yerine birim yönetici yardımcılarının komisyona atanması önerilmektedir. Bu sayede kalite güvencesi faaliyetlerinin tüm alt birimlere etkili bir şekilde yayılması hedeflenmektedir. Şekil 3'te sunulan örnek organizasyon şeması, üniversitelerdeki kalite yönetimi organizasyonuna dair bir fikir vermektedir. Ancak, yeni kurulan üniversitelerin sınırlı insan kaynağı göz önünde bulundurulduğunda, KGS'nin sürdürülebilirliği için bir akademik ve bir idari personelin Kalite Koordinatörlüğü bünyesinde tam zamanlı görevlendirilmesi önem taşımaktadır. Unutulmamalıdır ki, sürdürülebilir bir iç kalite güvencesi sistemi için insan kaynağının yanı sıra üst yönetimin desteği de kritiktir. Özellikle iç paydaşların sistemi benimsemesinde, üniversite üst yönetimi ve kalite yöneticilerinin teşvik edici rolü büyük önem taşımaktadır [23].



Şekil 3. Kalite yönetimi organizasyon şeması örneği [9].

Figure 3. Quality management organization chart example [9].

2.4 Eğitimler

Yükseköğretim kurumlarında, kurumsallaşmanın bir parçası olarak genellikle Personel Daire Başkanlığı tarafından koordine edilen hizmet içi eğitimler düzenlenmektedir. Bu eğitimler çoğunlukla aday memurlara yönelik temel eğitimler veya oryantasyon çalışmaları şeklindedir. Ancak, KGS'nin yapılandırılması kapsamında kalite bilincini artırmaya yönelik eğitimlere de ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, iç paydaşlara ve öğrencilere yönelik "Kalite Bilinçlendirme Eğitimi", "Toplam Kalite Yönetimi Eğitimi", "Organizasyon Şeması, Görev Tanımı ve İş Akışları Eğitimi" ve "Kurumsal İç Değerlendirme Eğitimi" gibi eğitimler önerilmektedir. Kalite konusunun yanı sıra, eğiticilerin gelişimine katkı sağlayacak eğitimler de önemlidir. Bu kapsamda alınması gereken Eğiticilerin Eğitimi; "Etkili İletişim Becerileri Eğitimi", "Ölçme ve Değerlendirme Eğitimi", "Öğretim İlke ve Yöntemleri Eğitimi", "Eğitim Psikolojisi Eğitimi", "Sınıf Yönetimi Eğitimi" ve "Dijital Öğrenme Eğitimi" konularını kapsamalıdır. Bu eğitimler, paydaş memnuniyetini esas alan bir anlayışın kurum kültürü haline gelmesine ve kurumsallaşmaya katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Eğitimler, kurum içi insan kaynakları tarafından veya T.C. Cumhurbaşkanlığı Uzaktan Eğitim Kapısı üzerinden çevrimiçi olarak gerçekleştirilebilir [9].

2.5 Dokümantasyon

Kalite güvencesi süreçlerinin etkili yönetimi için, tüm süreçlere ait dokümantasyonun (organizasyon şemaları, görev tanımları, iş akışları, prosedürler) eksiksiz ve güncel olması ve yazıldığı gibi uygulanması kritik öneme sahiptir. İç kalite güvencesi sisteminin önemli mekanizmaları olan organizasyon şemaları, görev tanımları ve iş akışlarının etkin bir şekilde hazırlanması gerekmektedir. Organizasyon şemaları, birimlerin mevcut yapısını doğru bir şekilde yansıtmalıdır. Görev tanımları, organizasyon şemalarında yer alan pozisyonlara ait görev, yetki ve sorumlulukları, görevin gerektirdiği nitelikleri ve özellikleri ayrıntılı olarak açıklamalıdır. İş akışları ise kurumun tüm birimlerindeki süreçleri kapsamalı, süreçlerin kısa tanımlarını, girdilerini, çıktılarını, ilgili mevzuat bilgilerini, iş akış adımlarını, performans göstergelerini ve iş akış şemalarını içermelidir.

Dokümantasyonun sistematik bir yapıya sahip olması, sürekli iyileştirme süreçlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin; iş akışlarının ve prosedürlerin detaylı olarak belgelenmesi, her bir sürecin adımlarının izlenebilir olmasını sağlar. Bu izlenebilirlik, kalite yönetimi ekiplerinin süreçlerde meydana gelen sapmaları veya gelişim fırsatlarını daha hızlı ve etkin bir şekilde belirlemesine yardımcı olacaktır. Bu dokümantasyon, kalite güvencesi süreçlerinin şeffaflığını ve izlenebilirliğini artırarak, sürekli iyileştirme çabalarına rehberlik eder. Ayrıca, dokümantasyonun mühendislik yaklaşımıyla yapılandırılması, veri güvenliği açısından da faydalı olacaktır. Tüm sürecin ayrıntılı bir şekilde belgelenmesi, süreçlerdeki değişikliklerin izlenmesine olanak tanıyarak bu değişikliklerin sürekli iyileştirme kapsamında değerlendirilmesini kolaylaştıracaktır. Mühendislik disiplini doğrultusunda tasarlanan bu dokümantasyon yapısı, kalite güvencesi sisteminin güvenilirliğini artıracak, süreçlerin yeniden yapılandırılması gerektiğinde yol gösterici bir kaynak sağlayacak ve kurumsal hafızayı güçlendirecektir.

2.6 Geri bildirim sistemleri

KGS'nin etkinliği için, tüm birimleri kapsayan geri bildirim sistemleri hayati öneme sahiptir. Bu sistemler aracılığıyla toplanan "Teşekkür, Öneri, Şikâyet ve Bilgi Talebi" gibi geri bildirimler, kurumlar tarafından bilgi sistemleri üzerinden kayıt altına alınmalıdır. Mühendislik süreçlerinden esinlenerek oluşturulan geri bildirim sistemleri, özellikle PUKÖ döngüsünün daha etkin çalışmasına katkı sağlamaktadır. Mühendislik disiplini, geri bildirimlerin sadece toplanmasıyla sınırlı kalmayıp analiz edilerek sistemli bir iyileştirme sürecine yönlendirilmesini amaçlar. Geri bildirim mekanizmaları sayesinde süreçlerdeki iyileştirme fırsatları tespit

edilebilmekte, veriye dayalı analizlerle bu iyileştirmelerin planlanması ve uygulanması sağlanabilmektedir. Bu yaklaşımla geri bildirimlerin mühendislik tabanlı yöntemlerle analiz edilmesi, sorunların kökenine inerek çözüm önerilerinin geliştirilmesi açısından önem taşır.

Sistematik bir geri bildirim yönetimi, sürecin her aşamasında ölçülebilir veri sağlamayı ve alınan geri bildirimlerin iyileştirme döngüsünde etkin kullanılmasını destekler. Bu sayede, kurum genelinde sürekli iyileştirme ve kalite artışı sağlanabilecektir. Mühendislik disipliniyle bütünleşmiş geri bildirim sistemleri, süreçlerin izlenebilirliğini artırarak KGS'nin sürdürülebilirliğine ve gelişimine önemli katkılar sunar. Kalite Komisyonu, belirlediği periyotlarda tüm birimlerden bu geri bildirimlere ilişkin raporları alarak değerlendirmeli ve gerektiğinde birimlere düzeltici veya önleyici faaliyet önerilerinde bulunmalıdır. Bu sayede, kurum genelinde sürekli iyileştirme ve kalite artışı sağlanabilir.

2.7 Anketler

KGS kapsamında, yükseköğretim kurumları tüm paydaşlarının hizmet memnuniyetini, kurumsal aidiyetini ve motivasyonunu ölçmek, değerlendirmek ve geliştirmek amacıyla düzenli olarak anketler uygulamalıdır. Bu amaçla Kalite Komisyonu bünyesinde bir çalışma grubu oluşturulabilir. İlk aşamada akademik personel, idari personel, öğrenci ve dış paydaş memnuniyetine odaklanılarak, zamanla özel yaklaşım gerektiren paydaş memnuniyeti anketi, yeni mezun değerlendirme anketi, mezunlara yönelik eğitim-öğretim programlarını değerlendirme, istihdam durumu değerlendirme ve üniversiteye yönelik genel görüş anketleri, ders değerlendirme anketi, ilk adım anketi, etkinlik değerlendirme anketi gibi farklı anketler de uygulanabilir. Anket sonuçları, kurumun Kalite Komisyonu veya Kalite Koordinatörlüğü internet sayfasında kamuoyuyla paylaşılabilir.

2.8 Mezun bilgi sistemi

Yükseköğretim kurumlarından mezun olan bireylerle iletişim ve dayanışmayı sürdürmek, görüş ve önerilerini almak amacıyla kurumlar bünyesinde mezun bilgi sistemleri kurulmuştur. İnternet tabanlı bu sistemler kuruma dair haberler, anketler, diğer mezunlarla iletişim imkânı ve kişisel bilgilerin güncellenebileceği alanlar içermektedir.

2.9 Veri değerlendirme ve bilgi yönetim sistemleri

Kalite güvencesi sistemleri veriye dayalı olmaları sebebiyle kurumlarda verilerin etkin ve güvenilir bir şekilde yönetilmesi büyük önem taşımaktadır. Dijitalleşmenin yaygınlaşmasıyla birlikte, verilerin elektronik ortamlarda işlenmesi ve veri tabanlarında saklanması önem kazanmıştır. Yükseköğretim kurumları, bu verileri analiz ederek raporlayabilecek uzman sistemlere ihtiyaç duymaktadır. Ancak, yeni kurulan devlet üniversitelerinin sınırlı kaynakları nedeniyle bu tür sistemleri devreye almaları zor olabilir. İhtiyaçlara cevap verebilen, dinamik raporlama sunan ve kullanıcı dostu bilgi yönetim sistemleri, üniversitelerin rekabet gücünü artıracaktır.

Veri değerlendirme ve bilgi yönetim süreçlerinde mühendislik odaklı tekniklerin uygulanması, verinin analiz edilmesi ve süreçlerin iyileştirilmesi açısından önemli katkılar sağlar. Mühendislikte kullanılan süreç optimizasyonu, performans ölçümü ve istatistiksel analiz gibi yöntemler, verilerin anlamlı hale getirilmesini kolaylaştırarak kalite yönetim sisteminin etkinliğini arttıracaktır. Örneğin; performans ölçüm teknikleriyle sürece dair elde edilen veriler, süreçlerdeki verimlilik ve kalite düzeylerinin anlık olarak izlenmesine olanak tanımaktadır. Süreç optimizasyonu yöntemleri ise verimliliği artırmak için hangi adımların iyileştirilmesi gerektiğini belirlemekte kullanılabilir. KGS açısından, izleme ve değerlendirme çalışmalarının daha verimli, tutarlı ve güvenilir bir şekilde gerçekleştirilmesi için bu sistemlerin kullanımı büyük önem taşımaktadır.

2.10 Akreditasyon hazırlıkları

Program akreditasyonu, bir akreditasyon kuruluşu tarafından belirlenen akademik ve alana özgü standartların bir yükseköğretim programı tarafından karşılanıp karşılanmadığını değerlendiren bir dış kalite güvencesi sürecidir. Türkiye'de akreditasyon kuruluşlarının yetkilendirme ve tanınması YÖKAK tarafından yapılmaktadır. Yeni kurulan üniversiteler için, önerilen zaman diliminde akreditasyon sürecine yönelik hazırlık çalışmalarına başlanması önemlidir. Bu kapsamda, her dönem sonunda ders dosyalarının hazırlanması ve program öz değerlendirme çalışmalarının yapılması tavsiye edilmektedir.

2.11 KGS ile ilişkili diğer çalışmalar

Kalite Koordinatörlüğü gibi kaliteden sorumlu birimler tarafından desteklenen, ancak doğrudan sorumlulukları altında olmayan ve diğer birimlerin sorumluluğunda olan "Fiziki Mekânların Standardizasyonu", ilgili mevzuat gereği tüm birimlerde uygulama birliğinin sağlanması amacıyla "Arşiv ve Depo Hizmetlerinin Standardizasyonu", binalarda yönlendirme, koruma, güvenlik, kat planı gibi levhaların iş sağlığı ve güvenliği, deprem vb. ilgili mevzuatlara uyumlu olması amacıyla "Bina Levhaları Standardizasyonu", "Bilgi ve İletişim Güvenliği Denetim Rehberi Uygulamaları", "Dosyalama Sistemleri Standardizasyonu" ve resmi yazışma mevzuatı çerçevesinde kullanılan "Desimal Dosya Sistemi Düzeninin Standartlaştırılması (dosya sırtlıkları, dolap içi ve dışı düzenlemeler)" gibi çalışmalar KGS ile dolaylı olarak ilişkilidir. Bu çalışmalar, KGS'nin kapsamlı ve etkili bir şekilde uygulanması için önemlidir, ancak kaliteden sorumlu birimler bu çalışmaları doğrudan yürütmek yerine, ilgili birimlere destek ve rehberlik sağlarlar.

3 Yüksek öğretim kurumlarında paydaş memnuniyeti analizi için anket sistematiği

KGS, yükseköğretim kurumlarının hizmet kalitesini sürekli iyileştirmeyi hedefleyen yapı, süreç ve politikaların bütünüdür. Öz değerlendirme ve dış değerlendirme süreçleri aracılığıyla kurumların performansını ve kalitesini objektif bir şekilde değerlendiren KGS'nin sürdürülebilirliği, paydaş memnuniyetinin ölçülmesine bağlıdır.

Paydaş memnuniyeti ölçümü, öğrenciler, akademik ve idari personel, mezunlar, iş dünyası, toplum ve diğer paydaşların eğitim-öğretim, araştırma-geliştirme, toplumsal katkı ve diğer hizmet sunumlarından duydukları memnuniyet düzeyini belirlemeyi amaçlar. Bu ölçümler, yükseköğretim kurumlarının kalite güvencesi süreçlerine katkı sağlayarak kurumların sürekli gelişimine ve başarısına yönelik önemli veriler sunar. KGS ise paydaş memnuniyetini artırmak için gerekli önlemleri ve süreçleri belirleyerek kurumların kaliteli ve başarılı bir eğitim ortamı sunmasını sağlar.

Yeni kurulan ve gelişmekte olan yükseköğretim kurumlarında paydaş memnuniyetinin ölçülmesi, kurumun sürdürülebilir başarısı ve gelişimi için kritik öneme sahiptir. Bu süreç, aşağıdaki altı adımdan oluşur:

1. Hedef Belirleme: Paydaş memnuniyeti ölçümünün amacı ve hedefleri belirlenir. Hangi paydaş gruplarının (öğrenciler, akademik ve idari personel, mezunlar, işverenler vb.) hangi boyutlarda memnuniyetlerinin ölçüleceği netleştirilir,
2. Anket Geliştirme: Paydaş memnuniyetini ölçmek için uygun bir anket geliştirilir. Anket, paydaşların kurumla ilgili farklı boyutlarda memnuniyetlerini değerlendirecek önermeler içermelidir. Literatürdeki ya da diğer yükseköğretim kurumlarında uygulanmakta olan örneklerden yararlanılabilir veya tamamen yeni bir anket tasarlanabilir. Önermelerin dil ve içerik uygunluğu titizlikle kontrol edilmelidir,
3. Örneklem Seçimi: Araştırmanın hedef kitlesi olan paydaş gruplarını temsil edecek bir örneklem seçilir. Örnekleme yöntemleri kullanılarak farklı paydaş gruplarından uygun örneklem oluşturulur,
4. Veri Toplama: Seçilen örneklem üzerinde anket uygulanır. Anketlerin hedef kitleye dağıtılması ve toplanması sağlanır,
5. Veri Analizi: Toplanan veriler istatistiksel olarak analiz edilir. Frekans dağılımları, ortalamalar, standart sapmalar ve ilgili istatistiksel testler kullanılarak paydaş memnuniyet düzeyleri anlaşılır, farklı gruplar arasında karşılaştırmalar yapılır ve önemli ilişkiler belirlenir,
6. Raporlama: Veri analizi sonuçları detaylı bir şekilde incelenir ve yorumlanır. Paydaş memnuniyetinin genel durumu ve farklı boyutlardaki memnuniyet düzeyleri hakkında bilgi verilir. Bulgular yorumlanarak paydaş geri bildirimlerine dayalı olarak güçlü yönler ve gelişmeye açık alanlar belirlenir. Hazırlanan rapor, paydaş memnuniyeti ile ilgili bulguları, istatistiksel analiz sonuçlarını, ankette alınan geri bildirimleri ve iyileştirici önerileri içermelidir. Kalite Komisyonu onayıyla kurum yönetimi ve ilgili paydaşlara sunulur.

Paydaş memnuniyeti ölçümü tek seferlik değil, sistematik bir şekilde gerçekleştirilmelidir. Kurum, düzenli aralıklarla paydaş memnuniyetini izlemeli ve değerlendirmelidir. Bu sürekli izleme ve değerlendirme, kurumun gelişimi için önemli bir geri bildirim mekanizması sağlayarak gelecekteki iyileştirme çalışmalarının temelini oluşturur.

4 Gelişmekte olan bir yükseköğretim kurumunda paydaş memnuniyeti analiz çalışması

Bu çalışmada, Kalite Güvencesi Sistemi'nin (KGS) yapılandırılması ve sürdürülebilirliği amacıyla, tüm paydaşların kuruma ilişkin genel algılarını ve düşüncelerini ölçmek ve genel memnuniyeti sağlamak üzere kurum yönetiminin hangi alanlara odaklanması gerektiğini tespit etmek için memnuniyet anketleri geliştirilmiş ve önerilmiştir. Gelişmekte olan bir yükseköğretim kurumunda uygulanan bu anketlerden elde edilen veriler, istatistiksel analizlerle değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında tüm paydaş grupları için analiz çalışmaları gerçekleştirilmiş olup, elde edilen genel bulgular özetlenmiştir. Kullanılan yöntemin açıklayıcı bir şekilde aktarılmasını sağlamak ve modelin uygulanabilirliğini gösterebilmek adına akademik personel grubu üzerinden detaylı analizler takip eden altbölümlerde sunulmuştur. Analiz sonuçları, KGS'nin sürdürülebilirliği için gerekli önlemlerin belirlenmesinde ve iç ve dış paydaşların memnuniyetini artırmaya yönelik çalışmalarda kullanılacaktır. Ayrıca, bu sonuçlar, kurumun KGS'yi sürdürülebilir kılmak için yapacağı iyileştirmeleri belirlemede de önemli bir kaynak oluşturacaktır.

4.1 Metodoloji

Analiz çalışması kapsamında paydaş memnuniyetini ölçmek üzere, ilgili literatür taraması ve uzman görüşleri doğrultusunda anketler geliştirilmiştir. Geliştirilen anketlerdeki önermeler Ek-A'da ayrıntılı olarak sunulmuştur. Anketler, yükseköğretim kurumunun dört temel paydaş grubunu hedeflemektedir: öğrenciler, akademik personel, idari personel ve dış paydaşlar. Her bir paydaş grubunun kurumla etkileşim biçimleri ve beklentileri farklılık gösterdiğinden, anketler bu farklılıkları dikkate alacak şekilde özel olarak tasarlanmıştır. Tablo 1'de, her bir paydaş grubu için anketlerde yer alan boyutlar ve bu boyutlardaki önerme sayıları özetlenmiştir. Boyutlar "Yükseköğretimde Öğrenci Yaşamından Memnuniyet", "Liderlik, Yönetişim ve Kalite", "Eğitim ve Öğretim", "Araştırma ve Geliştirme", "Toplumsal Katkı", "Temel Değer Analizi", "Üniversiteye Yönelik Genel Algı Düzeyi" ve "Genel Memnuniyet" ile ilgili önermeleri kapsamaktadır.

Tablo 1. Paydaşlar bazında önerme grupları.

Table1. Suggestion groups by stakeholders.

Anket boyutları (Toplam önerme sayısı)	Akademik personel	İdari personel	Öğrenci	Dış paydaş
1. Yükseköğretimde öğrenci yaşamından memnuniyet (10)			√ (10)	
2. Liderlik, yönetişim ve kalite (29)	√ (26)	√ (29)	√ (9)	
3. Eğitim ve öğretim (10)	√ (8)		√ (10)	
4. Araştırma ve geliştirme (9)	√ (9)		√ (6)	
5. Toplumsal katkı (6)	√ (6)	√ (4)	√ (3)	
6. Temel değer analizi (16)				√ (16)
7. Üniversiteye yönelik genel algı düzeyi (15)				√ (15)
8. Genel memnuniyet (1)	√	√	√	√

Bu çalışmada, kalite güvencesi modelinin uygulanabilirliğini değerlendirmek için çoklu doğrusal regresyon analizi kullanılmıştır. Regresyon analizi, paydaş memnuniyeti üzerinde etkili olan faktörleri belirleme ve modelin çıktılarının karar alma süreçlerinde nasıl kullanılabileceğini ortaya koyma açısından uygun bir yöntemdir. Bağımlı değişkenin birden fazla bağımsız değişken ile olan ilişkisini analiz etmeye yarayan bu yöntem, paydaş memnuniyeti üzerinde etkili olan faktörlerin belirlenmesinde kullanılmıştır. Literatürde yapısal eşitlik modellemesi (Structural Equation Modeling–SEM) gibi yöntemler, değişkenler arasındaki karmaşık ilişkileri incelemek ve teorik model test etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [20, 24]. Ancak bu çalışmanın amacı teorik model geliştirmek değil, kalite güvencesi sisteminin uygulanabilirliğini test ederek yönetimsel karar süreçlerine yönelik somut öneriler sunmaktır. Yeni kurulan üniversitelerde veri setleri genellikle sınırlıdır ve SEM gibi karmaşık modellerin geçerli sonuçlar üretebilmesi için daha geniş örneklemler ve doğrulayıcı faktör analizleri gereklidir. Regresyon analizi ise küçük veri setlerinde bile güçlü ve anlamlı sonuçlar sağlayabilen bir yöntemdir. Bu bağlamda, regresyon analizi ile SEM arasındaki temel farklar Tablo 2'de özetlenmiştir.

Anketlerden elde edilen verilerin analizi, iki evrede gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, her bir paydaş grubu için memnuniyete etki eden temel faktörleri belirlemek amacıyla açıklayıcı faktör analizi (AFA) kullanılmıştır. AFA, değişkenler arasındaki ilişkilere dayanarak, bu değişkenlerin sayısını azaltmayı ve özetlemeyi amaçlayan bir istatistiksel yöntemdir [25]. Veriler arasındaki yapısal ilişkileri keşfetmek amacıyla kullanılan AFA, gözlenen değişkenleri daha az sayıdaki gizil faktörler altında toplamayı hedefler. Bu yöntem, paydaş memnuniyet anketinde yer alan ifadelerin altında yatan ortak boyutları tanımlamak amacıyla tercih edilmiştir. Çok değişkenli analizlerde kullanılan değişken sayılarının artmasıyla önemli bir gelişme gösteren faktör analizinde, gizli faktörlerle ilgili temel fikirlerin oluşumu 1888 yılında Galton'a kadar uzanırken, faktör yapısı için asıl matematiksel model, Karl Pearson'un 1904 yılında geliştirdiği "Temel Eksenler Yöntemi" ile ortaya çıkmıştır. Bu yöntem, Spearman'ın akılcı test sonuçları arasındaki ilişkilerin genel bir zekâ faktörü tarafından açıklanabileceği ve diğer faktörlerin bireysel testlerdeki özgün özellikleri yansıttığı şeklindeki hipotezinden farklılık gösterir [26]. Sonraki çalışmalarda, bu model birçok ortak faktörü içeren daha karmaşık modellere dönüştürülmüştür. Bu alanda özellikle L. L. Thurstone'un çalışmaları önemlidir. Thurstone, aynı zamanda "Örneklem Matrisinden Faktör Çıkarılması" üzerinde de çalışarak faktör analizi yönteminin gelişimine katkı sağlamıştır. Bu yöntem sayesinde, çok sayıda değişken, kendi içinde homojen, ancak birbirleriyle heterojen olan daha az sayıda faktör (değişken) altında toplanabilir [27]. Faktör analizi, tüm değişkenlerin eş zamanlı olarak değerlendirildiği ve bu değişkenlerin bazı önemli, gizli faktörlerin bir fonksiyonu olarak düşünüldüğü bir bağımlılık tekniğidir. Faktör analizi, temelde bir veri azaltma tekniğidir. Birbiriyle ilişkili verileri ve bu verileri temsil eden veri setlerini, daha az sayıda ve anlamlı değişkenlere veya faktörlere indirgemeyi amaçlar. AFA, araştırmacının değişkenler arasındaki ilişkilere dair önceden bir hipotezi veya beklentisi olmadığı durumlarda, bu ilişkileri ortaya çıkarmak için kullanılan bir yöntemdir [28]. AFA, herhangi bir göstergenin herhangi bir faktörle ilişkili olabileceği varsayımıyla hareket ederek, büyük bir değişkenler kümesinin altında yatan yapıyı keşfetmeye çalışır [29]. Bu çalışmada da kalite güvencesi sistemine yönelik literatürde belirli ve test edilmiş bir faktör yapısı olmadığından dolayı paydaş memnuniyetine etki eden faktörleri belirlemek ve bu faktörlerin memnuniyet üzerindeki etkisini analiz etmek amacıyla AFA kullanılmıştır. Alternatif olarak kullanılabilecek Doğrulayıcı Faktör Analizi (DFA) ve Yapısal Eşitlik Modellemesi (SEM), önceden tanımlanmış faktör yapılarını doğrulamak için uygundur. Ancak bu çalışmanın amacı faktör yapısını keşfetmek olduğundan, AFA daha uygun bir yöntem olarak değerlendirilmiştir.

Son evrede ise, AFA sonrasında elde edilen faktörler, regresyon analizinde bağımsız değişken olarak kullanılarak modelin açıklayıcılığı test edilmiştir. Belirlenen faktörlerin memnuniyet üzerindeki etkisini incelemek ve bu etkinin derecesini belirlemek amacıyla çoklu doğrusal regresyon analizi uygulanmıştır. Regresyon analizi, bir bağımlı değişken ile bir veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi modelleyen bir istatistiksel yöntemdir. Bu çalışmada bağımlı değişken olarak paydaş memnuniyeti, bağımsız değişkenler olarak ise faktör analizi ile belirlenen faktörler (boyutlar) kullanılmıştır.

Tablo 2. Çoklu doğrusal regresyon ile SEM yöntemlerinin karşılaştırılması.

Table2. Comparison of multiple linear regression and SEM methods.

Özellik	Çoklu Doğrusal Regresyon (Kullanılan Yöntem)	Yapısal Eşitlik Modellemesi (SEM)
Amaç	Değişkenler arasındaki doğrudan etkileri ölçmek, karar süreçlerine rehberlik etmek.	Değişkenler arasındaki karmaşık ilişkileri modellemek, teorik çerçeve doğrulamak.
Veri ihtiyacı	Küçük ve orta ölçekli veri setleriyle uygulanabilir.	Büyük veri setleri gerektirir.
Yöntem	Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisini tahmin eder.	Doğrudan ve dolaylı etkileri hesaplar.
Uygulanabilirlik	Yönetimsel karar alma süreçlerinde pratik sonuçlar sunar.	Teorik model testi için uygundur.
Avantajlar	Hızlı ve basit analiz, yönetim kararları için uygulanabilir sonuçlar sunar.	Karmaşık ilişkileri modelleyebilme yeteneğine sahiptir.
Sınırlılıklar	Yalnızca doğrudan etkileri gösterir, dolaylı etkileri modelleyemez.	Büyük örneklem gerektirir, yorumlanması karmaşıktır.

Bu yöntem, kalite güvencesi süreçlerinin paydaş memnuniyetine etkisini bilimsel bir yöntemle belirlemek ve analiz etmek amacıyla tercih edilmiştir. Faktör analizi sonrası yapılan regresyon analizi, bağımsız değişkenlerin paydaş memnuniyeti üzerindeki etkisini açıklamaya yardımcı olmuş ve modelin doğruluğunu artırmıştır.

Analiz çalışmasının uygulama evreni olarak, 2018 yılında kurulmuş ve halen gelişme aşamasında olan bir devlet üniversitesi seçilmiştir. Tasarlanan anketler, bu üniversitenin farklı paydaş gruplarının katılımıyla gerçekleştirilmiştir. Söz konusu yükseköğretim kurumu, 7 Fakülte, 1 Enstitü, 3 Meslek Yüksekokulu ve 1 Yüksekokuldan oluşan bir yapıya sahip olup, 246 akademik personel, 198 idari personel ve 4452 öğrenciye ev sahipliği yapmaktadır. Eğitim-öğretim faaliyetleri kapsamında, akademik birimlerde 26 Lisansüstü, 18 Lisans ve 23 Ön Lisans programı aktif olarak yürütülmektedir. Araştırmada, belirli sayıdaki örneklemin yığını temsil ettiği varsayımıyla hareket edilerek, elde edilen verilerin genelleştirilmesi için basit tesadüfi örnekleme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle, araştırma evrenindeki tüm paydaşların görüşlerinin temsil edildiği kabul edilmiştir. Bu sayede, anket sonuçlarının üniversitenin genel durumu hakkında anlamlı ve güvenilir bilgiler sunacağı düşünülmektedir.

Çalışmada, veri toplama sürecinin hızlı ve etkili bir şekilde gerçekleştirilmesi amacıyla, üniversitenin mevcut bilgi yönetim sistemi altyapısında yer alan Google Forms kullanılmıştır. Bu sayede, anketler hedef kitleye kolaylıkla ulaştırılmış ve elde edilen veriler elektronik tablolar aracılığıyla toplanarak analiz sürecine hazır hale getirilmiştir. Anketlerdeki önermeler, katılımcıları yönlendirmemeye özen gösterilerek titizlikle hazırlanmıştır. Farklı boyutları kapsayan önermeler, katılımcıların kolaylıkla anlayabileceği ve cevaplayabileceği şekilde kısa, basit ve açık bir dille ifade edilmiştir. Ayrıca, katılımcılara verdikleri cevapların herhangi bir yükümlülük veya bağlayıcılık doğurmayacağı ve 6698 sayılı Kişisel Verilerin Korunması Kanunu kapsamında gizli tutulacağı açıkça belirtilmiştir. Anket formunda isim, soy isim gibi kişisel bilgilere yer verilmeyerek katılımcıların çekinmeden ve dürüstçe cevaplar vermeleri sağlanmıştır. Veri toplama süreci tamamlandıktan sonra, tüm anket formları tek tek incelenerek hata ve eksiklikler kontrol edilmiştir. Yanıltıcı önermelere farklı yanıtlar veren katılımcıların anketleri analiz dışı bırakılarak, verilerin güvenilirliği ve tutarlılığı sağlanmıştır. Bu titizlikle yürütülen veri toplama ve temizleme süreci, analiz sonuçlarının geçerliliğini ve güvenilirliğini artırmıştır.

Analiz edilebilir nitelikteki anketler, SPSS (26.0) programı kullanılarak işlenmiştir. Anket formunun ilk bölümünde, katılımcıların demografik özelliklerini belirlemek amacıyla akademik ve idari personele bir soru yöneltilirken, dış paydaşlara beş soru yöneltilmiştir. Öğrencilere ait demografik veriler, kurumun bilgi yönetim sisteminden elde edilebildiği için öğrencilere bu bölümde soru sorulmamıştır. Anketin ikinci bölümünde ise katılımcıların memnuniyet düzeylerini ölçen önermeler yer almaktadır. Öğrenciler için hazırlanan anket, "Yükseköğretimde Öğrenci Yaşamından Memnuniyet", "Liderlik, Yönetişim ve Kalite", "Eğitim ve Öğretim", "Araştırma ve Geliştirme", "Toplumsal Katkı" ve "Genel Memnuniyet" olmak üzere altı boyut ve toplam 39 önermeden oluşmaktadır. Akademik personel anketi ise "Liderlik, Yönetişim ve Kalite", "Araştırma ve Geliştirme", "Eğitim ve Öğretim", "Toplumsal Katkı" ve "Genel Memnuniyet" olmak üzere beş boyut ve 50 önerme içermektedir. İdari personel anketi, "Liderlik, Yönetişim ve Kalite", "Toplumsal Katkı" ve "Genel Memnuniyet" olmak üzere üç boyut ve 34 önermeden oluşmaktadır. Dış paydaş anketi ise "Temel Değer Analizi", "Üniversiteye Yönelik Genel Algı Düzeyi" ve "Genel Memnuniyet" olmak üzere üç boyut ve 32 önerme içermektedir. Anketlerdeki önermeler 1-5 Likert ölçeğinde değerlendirilmiştir. Ayrıca, katılımcıların görüş ve önerilerini almak üzere her anketin sonunda bir açık uçlu soruya yer verilmiştir. Bu açık uçlu soruyla nicel verilerin yanı sıra nitel veriler de elde edilerek paydaş memnuniyetinin daha derinlemesine anlaşılmasının sağlanması amaçlanmaktadır.

4.2 Bulgular ve analiz

Uygulama kapsamında, anketlere 119 akademik personel (toplam akademik personel sayısının %48.37'si), 110 idari personel (toplam idari personel sayısının %55.5'i) ve 2 749 öğrenci (toplam öğrenci sayısının %54.1'i) katılım sağlamıştır. Katılımcıların demografik dağılımı incelendiğinde, akademik personelin %65.5'inin öğretim üyesi, %24.4'ünün öğretim görevlisi ve %10.1'inin araştırma görevlisi olduğu görülmüştür. Öğrenci katılımcıların ise %2.2'si lisansüstü, %38.8'i lisans ve %59'u ön lisans öğrencisi olduğu tespit edilmiştir.

Anketlerdeki önermeler 1-5 Likert ölçeğinde değerlendirilmiş olup, "kesinlikle katılıyorum" seçeneği 5 puan, "katılıyorum" seçeneği 4 puan, "kararsızım" seçeneği 3 puan, "katılmıyorum" seçeneği 2 puan ve "kesinlikle katılmıyorum" seçeneği 1 puan olarak kodlanmıştır. Elde edilen veriler, "Olumlu" (4 ve 5 puan), "Olumsuz" (1 ve 2 puan) ve "Kararsız" (3 puan) olmak üzere üç grupta incelenmiştir. 1-5 Likert ölçeğinin tercih edilme nedeni, katılımcıların farklı akademik ve idari profillere sahip olması nedeniyle ölçek kullanımının kolay ve anlaşılır olmasını sağlamaktır. Ayrıca, yükseköğretim kalite güvencesi alanında yapılan benzer çalışmalarda yaygın olarak kullanılan bir yöntem olması nedeniyle, literatürdeki bulgularla karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilmesi amaçlanmıştır. Anket verilerine faktör analizi uygulamadan önce, ölçeklerin güvenilirliği Cronbach Alpha katsayısı ile test edilmiştir. Öğrenci memnuniyet anketi için Cronbach Alpha değeri 0.958, akademik personel memnuniyet anketi için 0.972 ve idari personel memnuniyet anketi için 0.962 olarak bulunmuştur. Ayrıca örneklem büyüklüğünün yeterliliğini değerlendirmek için Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) testi analiz verilerine uygulanmış olup, akademik personel için 0.904, idari personel için 0.902 ve öğrenciler için de 0.976 değerleri KMO testi sonucunda elde edilmiştir. Bu yüksek değerler, ankette yer alan önermelerin tutarlı olduğunu ve aynı özelliği ölçtüğünü göstermektedir. Öğrenci katılımcı grubunda, lisansüstü öğrencilerin oranının görece düşük olması, üniversitenin genel öğrenci demografisiyle uyumlu karşılanmaktadır. Çalışmanın gerçekleştirildiği evren yeni kurulan ve gelişmekte olan bir üniversite olması sebebiyle, lisansüstü öğrenci sayısı toplam öğrenci sayısına kıyasla sınırlı kalmıştır. Bu durum örneklem dağılımına doğal olarak yansımış olup, çalışmanın temel amacı doğrultusunda anket verileri tüm öğrenci gruplarını temsil edecek şekilde analiz edilmiştir. KMO testi sonuçlarının yüksek olması da örneklem büyüklüğünün yeterliliğini desteklemektedir.

Anket sonuçlarının analizi, öncelikle önermelere dair yanıtların dağılımlarının grafiksel olarak incelenmesiyle başlamıştır. Ardından, kurum paydaşları unvan bazında gruplandırılarak normallik analizi, faktör analizi ve regresyon analizi yapılmıştır. Faktör analizi sonuçlarının detaylı bir şekilde incelenmesi amacıyla, toplam varyans, döndürülmüş bileşen matrisi, faktör

ortalamaları, madde ortalamaları, faktör yük değerleri ve faktör soru dağılımları gibi temel çıktılar titizlikle analiz edilmiştir. Bu analizler, verilerin yapısal düzenini anlamlandırmak ve paydaş memnuniyetini etkileyen temel faktörleri belirlemek için önemli birer araç olarak kullanılmıştır. Çalışma kapsamında tüm paydaş gruplarına yönelik analizler gerçekleştirilmiştir; ancak Dış Paydaş Memnuniyet Anketi için yeterli sayıda yanıt elde edilemediği için, bu anket analizlere dahil edilmemiştir. Analizler sonucunda ortaya çıkan faktör ortalamaları Tablo 3'te detaylı bir şekilde sunulmuştur.

Akademik Personel Memnuniyet Anketi'ne ilişkin faktör analizi sürecinde, 29 No.lu maddenin tek başına bir faktör oluşturduğu ve diğer maddelerle anlamlı bir ilişki göstermediği tespit edilmiştir. Bu nedenle, 29 No.lu madde analizden çıkarılmış ve veriler tekrar analiz edilmiştir. Yapılan bu ikinci analiz sonucunda, faktörlerin anketi açıklama oranı %72.33 olarak belirlenmiş ve öz değeri 1'den büyük olan 8 alt boyutun oluştuğu görülmüştür. Bu alt boyutlar, akademik personelin memnuniyetini etkileyen temel faktörleri temsil etmektedir. Tablo 3'te sunulan faktör ortalamaları, her bir faktörün genel olarak ne düzeyde memnuniyet sağladığına dair önemli bilgiler sunmaktadır. Bu bilgiler, kurumun hangi alanlarda daha başarılı olduğunu ve hangi alanlarda iyileştirme yapması gerektiğini belirlemek için kullanılabilir. Faktör yük değerleri ve faktör soru dağılımları incelendiğinde, her bir faktörün hangi maddelerden oluştuğu ve bu maddelerin faktöre ne kadar katkı sağladığı detaylı bir şekilde anlaşılmaktadır. Ayrıca, katılımcıların bu maddelere verdikleri cevapların dağılımı, faktörlerin önemini ve iyileştirilmesi gereken alanları belirlemede önemli ipuçları sunmaktadır.

Tespit edilen 8 faktörün yük değerlerine göre dağılımları incelendiğinde, bu faktörlerin "Toplumsal Katkı ve Ar-Ge Etkileşimi", "Kurumsal Yönetim", "Üniversite İmkanları", "Eğitim ve Öğretim Faaliyetlerinde İş Birlikleri", "İdari Hizmetler", "Fiziksel ve Sosyal İmkanlar", "Öğrenme Altyapısı" ve "Araştırma ve Geliştirme Olanakları" olarak adlandırılabileceği öngörülmüştür. Bu faktörler, akademik personelin üniversite ile ilgili deneyimlerini ve memnuniyetlerini farklı boyutlarda yansıtmaktadır. Faktör analizi sonucunda elde edilen bu 8 faktör için regresyon skorları hesaplanmış ve bu skorlar kullanılarak "Genel Memnuniyet" üzerindeki faktör etkilerini araştırmak üzere çoklu doğrusal regresyon analizi uygulanmıştır. Bu analiz, hangi faktörlerin genel memnuniyet üzerinde daha belirleyici olduğunu ve bu faktörlerin memnuniyet üzerindeki etkisinin ne yönde ve ne kadar güçlü olduğunu belirlemek için kullanılmıştır.

Faktör analizi ile tespit edilen 8 faktöre ilişkin regresyon analizi sonuçları Tablo 4'te detaylı olarak sunulmuştur. Bu tabloda, regresyon denkleminin anlamlılığı ve hangi değişkenlerin istatistiksel olarak anlamlı olduğu bilgisi, katsayılarıyla birlikte verilmiştir. Modelin açıklayıcılık gücünü gösteren belirlilik katsayısı (R^2) 0.697 olarak hesaplanmış ve F istatistiği anlamlı bulunmuştur. Bu sonuçlar, kurulan modelin akademik personel memnuniyetini açıklamada oldukça başarılı olduğunu göstermektedir.

Anket çalışmasının bağımlı değişkeni, "Genel olarak Üniversitemizden memnunum." önermesidir. Bağımsız değişkenler ise faktör analizi sonucunda elde edilen 8 faktörü temsil eden faktör skorlarıdır. Bu faktörlerin genel memnuniyet üzerindeki etkilerini gösteren regresyon analizi sonuçları Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 5 incelendiğinde, 5. faktör ("İdari Hizmetler") ve 8. faktör ("Araştırma ve Geliştirme Olanakları")'nın %5 anlamlılık düzeyinde genel memnuniyet üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Bu durum, söz konusu faktörlerin regresyon modelinde yer almasına rağmen, akademik personelin genel memnuniyetini açıklamada diğer faktörler kadar güçlü bir rol oynamadığını göstermektedir. Regresyon analizi sonuçlarına göre, diğer faktörlerin genel memnuniyet üzerindeki etkileri şu şekildedir:

Tablo 3. Faktör ortalamaları (akademik personel memnuniyet anketi).

Table 3. Factor averages (academic staff satisfaction survey).

	Başlangıç öz değerleri			Yüklenen faktörlerin karelerinin dağılım toplamları		
	Toplam	Varyans (%)	Birikimli (%)	Toplam	Varyans (%)	Birikimli (%)
1	22.188	47.209	47.209	7.833	16.667	16.667
2	2.647	5.631	52.840	6.457	13.739	30.406
3	2.030	4.319	57.159	4.712	10.025	40.430
4	1.861	3.959	61.118	3.815	8.118	48.548
5	1.502	3.196	64.314	3.154	6.711	55.260
6	1.448	3.080	67.394	3.095	6.584	61.844
7	1.250	2.660	70.054	2.815	5.989	67.833
8	1.069	2.274	72.327	2.112	4.494	72.327
9	.937	1.994	74.321			
10	.864	1.837	76.158			
…	…	…	…			
47	.045	.096	99.949			
48	.024	.051	100.000			

Tablo 4. Regresyon analizi-varyans analizi.

Table 4. Regression analysis-variance analysis.

	Toplam kareler	Serbestlik derecesi	Kare ortalaması	F	p
Regresyon	42.521	8	5.315	30.790	0.000
Artık	18.471	107	.173		
Toplam	60.991	115			

R	R kare	Düzeltilmiş R kare
.835	.697	.675

Tablo 5. Regresyon analizi.

Table 5. Regression analysis.

	Standartlaştırılmış regresyon katsayısı	t	p
F1. Toplumsal katkı ve ar-ge etkileşimi	.296	5.557	.000
F2. Kurumsal yönetim	.574	10.784	.000
F3. Üniversite imkanları	.312	5.860	.000
F4. Eğitim ve öğretim faaliyetlerinde iş birlikleri	.244	4.588	.000
F5. İdari hizmetler	**.033**	**.612**	**.542**
F6. Fiziksel ve sosyal imkanlar	.236	4.437	.000
F7. Öğrenme altyapısı	.190	3.577	.001
F8. Araştırma ve geliştirme olanakları	**.010**	**.184**	**.854**

Bağımlı değişken(S1): Genel olarak üniversitemizden memnumum.

$$Bağımlı\ değişken(S1) = (0.296) * F1 + (0.574) * F2 + (0.312) * F3 + (0.244) * F4 + (0.033) * F5 + (0.236) * F6 + (0.190) * F7 + (0.010) * F8$$

$* p < 0.05$

1. Faktör ("Toplumsal Katkı ve Ar-Ge Etkileşimi"): Bir birimlik artış, genel memnuniyette 0.296 birimlik bir artışa neden olmaktadır,
2. Faktör ("Kurumsal Yönetim"): Bir birimlik artış, genel memnuniyette 0.574 birimlik bir artışa neden olmaktadır,
3. Faktör ("Üniversite İmkanları"): Bir birimlik artış, genel memnuniyette 0.312 birimlik bir artışa neden olmaktadır,
4. Faktör ("Eğitim ve Öğretim Faaliyetlerinde İş Birlikleri"): Bir birimlik artış, genel memnuniyette 0.244 birimlik bir artışa neden olmaktadır,
5. Faktör ("Fiziksel ve Sosyal İmkanlar"): Bir birimlik artış, genel memnuniyette 0.236 birimlik bir artışa neden olmaktadır,
6. Faktör ("Öğrenme Altyapısı"): Bir birimlik artış, genel memnuniyette 0.190 birimlik bir artışa neden olmaktadır.

Bu sonuçlar, bağımlı değişken olan "Genel olarak Üniversitemizden memnunum." önermesi ile bağımsız değişkenler olan faktör skorları arasındaki ilişkiyi matematiksel bir model olarak ifade eden regresyon denklemi ile özetlenebilir. Standartlaştırılmış regresyon katsayıları ve F değerlerinin çarpımları ile oluşturulan bu denklemde, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisi ölçülmektedir. Ancak, 5. ve 8. faktörlerin standartlaştırılmış regresyon katsayılarının 0.1'den küçük olması ve p değerlerinin 0.05'ten büyük olması, bu faktörlerin kurulan matematiksel modelde anlamlı bir etkisinin olmadığını göstermektedir.

4.3 Analizlerin genel değerlendirilmesi

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen öğrenci, akademik ve idari personel memnuniyet anketlerine faktör analizi ve regresyon analizi uygulanarak "Genel Memnuniyet" üzerindeki etkiler araştırılmıştır. Bu yöntemle, yeni kurulan ve gelişmekte olan yükseköğretim kurumları için paydaş memnuniyetini artırıcı önlemlerin belirlenmesi ve öncelikle dirilmesine yönelik önemli bir yol haritası sunulması amaçlanmıştır.

Akademik Personel Memnuniyetinin Artırılması: Regresyon analizi sonuçlarına göre, akademik personelin genel memnuniyetini artırmada en etkili faktörler sırasıyla "Kurumsal Yönetim" (%57.4) ve "Üniversite İmkanları" (%31.2) olarak belirlenmiştir. Bu bulgu, kurumsal yönetim süreçlerinin iyileştirilmesi ve üniversite imkanlarının (örneğin, araştırma fonları, laboratuvarlar, sosyal alanlar) geliştirilmesinin akademik personel memnuniyetini önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir. Diğer faktörler olan "Toplumsal Katkı ve Ar-Ge Etkileşimi" (%29.6), "Eğitim ve Öğretim Faaliyetlerinde İş Birlikleri" (%24.4), "Fiziksel ve Sosyal İmkanlar" (%23.6) ve "Öğrenme Altyapısı" (%19) da genel memnuniyet üzerinde anlamlı bir etkiye sahiptir.

İdari Personel Memnuniyetinin Artırılması: İdari personel memnuniyet anketinde, "Kurumsallaşma" (%60.7) ve "Üniversite İmkanları" (%55.8) faktörlerinin genel memnuniyet üzerinde en etkili faktörler olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, idari personelin kurumun yönetim süreçlerine ve

sağladığı imkanlara daha fazla dahil edilmesinin, memnuniyetlerini artırmada önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir. "Sosyal İmkanlar", "Yönetişim Memnuniyeti" ve "Çalışma Koşulları" faktörleri de idari personel memnuniyeti üzerinde anlamlı bir etkiye sahiptir.

Öğrenci Memnuniyetinin Artırılması: Öğrenci memnuniyet anketi sonuçları, "Üniversite Yönetimi ve Kurumsallaşma" faktörünün genel memnuniyet üzerinde %90 oranında belirleyici olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgu, üniversitenin yönetim süreçlerinin iyileştirilmesi, karar alma mekanizmalarının şeffaflaştırılması ve kurumsal kimliğin güçlendirilmesinin öğrenci memnuniyetini önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir. Diğer faktörler olan "Gelişim Fırsatları" ve "Eğitim, Öğretim ve Öğrenme İmkânları" da öğrenci memnuniyeti üzerinde anlamlı bir etkiye sahiptir.

Anket sonuçları, incelenen yükseköğretim kurumunda genel olarak yüksek bir memnuniyet düzeyi olduğunu göstermektedir. Ancak, her paydaş grubu için farklı öncelikli alanlar olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, kurum yönetiminin gerçekleştireceği planlamalarda bu farklılıklar dikkate alınarak, her paydaş grubunun memnuniyetini artırmaya yönelik özel hedefler belirlenmeli ve bu hedeflere ulaşmak için gerekli faaliyetler gerçekleştirilmelidir. Özellikle, "Kurumsal Yönetim" ve "Üniversite İmkanları" faktörlerinin hem akademik hem de idari personel memnuniyeti üzerinde belirleyici olması, bu alanlara yönelik iyileştirme çalışmalarının tüm paydaşların memnuniyetini artırmada önemli bir kaldıraç etkisi yaratabileceğini göstermektedir.

5 Sonuç

Bu çalışma, gelişmekte olan bir devlet üniversitesinde kalite güvencesi sisteminin (KGS) stratejik yönetim tabanlı bir modelle yapılandırılmasına odaklanmıştır. Literatür taraması, yeni kurulan ve gelişmekte olan üniversitelere özgü bir KGS modelinin eksikliğini ortaya koymuştur. Bu eksikliği gidermek amacıyla, bu çalışma kapsamında paydaş odaklı, sistematik ve stratejik bir yaklaşım benimsenerek mühendislik disiplini prensiplerine dayalı yenilikçi bir KGS modeli geliştirilmiştir.

Önerilen model, PUKÖ döngüsü felsefesini temel alarak sürekli gelişmeyi ve kaliteyi güvence altına almayı mühendislik bakış açısıyla hedeflemektedir. Sürekli gelişimin yanı sıra önerilen model, uzun vadede üniversitenin kalite güvencesi sisteminin sürdürülebilirliğine de katkıda bulunarak hem mevcut kaynakların verimli kullanımını hem de gelecekteki kalite gereksinimlerinin karşılanmasını mümkün hale getirmektedir. Model, paydaş memnuniyetine dayalı sistematik geri bildirim döngüleriyle sürdürülebilir bir gelişime imkân sağlamaktadır. Bu yaklaşım, yalnızca kısa vadeli iyileştirmelere odaklanmayıp, üniversitenin uzun vadede stratejik hedeflerine ulaşmasını destekleyen sürdürülebilir bir kalite yönetimi yapısı oluşturacaktır. Modelin uygulanabilirliğini ve etkinliğini test etmek amacıyla, 2018 yılında kurulmuş olan bir devlet üniversitesinde akademik personel, idari personel, öğrenciler ve dış paydaşlardan oluşan dört farklı paydaş grubuna yönelik memnuniyet anketleri uygulanmıştır. Anket verilerinin faktör ve regresyon analizleri ile değerlendirilmesi sonucunda, modelin paydaş memnuniyeti üzerinde olumlu etkileri olduğu ve genel memnuniyeti artırdığı tespit edilmiştir.

Analizler, farklı paydaş gruplarının memnuniyetini etkileyen faktörlerin farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Akademik personel için "Kurumsal Yönetim" ve "Üniversite İmkanları", idari personel için "Kurumsallaşma" ve "Üniversite İmkanları", öğrenciler için ise "Üniversite Yönetimi ve Kurumsallaşma" faktörleri genel memnuniyet üzerinde en belirleyici faktörler olarak tespit edilmiştir. Bu bulgular, kurum yönetimine, KGS'nin sürdürülebilirliğini sağlamak ve paydaş memnuniyetini artırmak için hangi alanlara öncelik vermesi gerektiği konusunda önemli bilgiler sunmaktadır.

Çalışmanın sonuçları, yeni kurulan ve gelişmekte olan yükseköğretim kurumlarının KGS'lerini yapılandırırken ve geliştirirken stratejik bir yaklaşım benimsemeleri gerektiğini göstermektedir. Önerilen model, bu tür kurumlar için bir yol haritası sunarken, paydaş memnuniyeti anketleri ve analizleri de kurumların kendi bağlamlarına özgü ihtiyaçlarını belirlemelerine ve KGS'lerini bu ihtiyaçlara göre uyarlamalarına yardımcı olabilir. Bu model, yalnızca mevcut kalite standartlarını sürdürmekle kalmayıp, üniversitenin rekabet gücünü ve kalite hedeflerini geleceğe taşıyan bir yapı sağlamaktadır. Bu model, sadece eğitim, öğretim ve öğrenme süreçlerinin değil, aynı zamanda kurumsal kaynakların da sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesine olanak tanıyan bir yapı sunmaktadır. Modeldeki mühendislik prensipleriyle uyumlu süreç iyileştirme ve kaynak optimizasyonu, kurumların rekabet gücünü artırarak kalite hedeflerini sürdürülebilir kılmaktadır. Sürekli iyileştirme süreçlerinin yanı sıra, teknolojik gelişmelere uyum sağlama ve dijitalleşmenin kalite süreçlerine entegrasyonunu destekleyerek sürdürülebilirliği sağlamaktadır. Bu sayede, yükseköğretim kurumları hem mevcut kalite standartlarını koruyabilir hem de gelecekteki gereksinimlere uyum sağlayacak esnek bir yapıya sahip olabilirler.

Bu çalışma, literatürde eksikliği tespit edilen, yeni kurulan ve gelişmekte olan üniversiteler için özel olarak tasarlanmış bir kalite güvencesi modeli sunarak önemli bir boşluğu doldurmaktadır. Önerilen model, mühendislik tabanlı sistematik yaklaşımlar, stratejik yönetim ilkeleri ve veriye dayalı karar mekanizmalarını entegre ederek kalite yönetimi süreçlerine yenilikçi bir bakış açısı kazandırmaktadır. Literatürde kalite güvencesi sistemleri üzerine çok sayıda farklı çalışmalar bulunmasına rağmen, paydaş memnuniyeti temelli analitik yöntemlerin (faktör analizi ve regresyon modeli) kullanıldığı, stratejik yönetim ile bütünleşik ve sürdürülebilir bir model geliştiren çalışmalara rastlanmamaktadır. Bu yönüyle çalışma hem akademik araştırmalar hem de yükseköğretim kurumlarında kalite güvencesi süreçlerinin yapılandırılması açısından uygulanabilir ve yaygınlaştırılabilir bir çerçeve sunmaktadır.

Çalışmanın tek bir devlet üniversitesinde gerçekleştirilmiş olması sebebiyle bulguların diğer yükseköğretim kurumlarına genellenebilirliği sınırlı olabilir. Gelecekteki araştırmalar, farklı üniversitelerde ve farklı paydaş gruplarıyla yapılacak çalışmalarla bu modelin genellenebilirliğini test edebilir. Ayrıca, nitel araştırma yöntemleri kullanılarak paydaş memnuniyetinin daha derinlemesine incelenmesi ve modelin uzun vadeli etkilerinin değerlendirilmesi de faydalı olacaktır.

Sonuç olarak, bu çalışma, yükseköğretimde kalite güvencesi alanına önemli katkılar sağlamaktadır. Önerilen mühendislik prensipleriyle desteklenen stratejik yönetim tabanlı KGS modeli, yeni kurulan ve gelişmekte olan üniversitelerin kalite süreçlerini daha etkin ve verimli bir şekilde yönetmelerine yardımcı olabilir. Ayrıca, paydaş memnuniyeti odaklı sistematik yaklaşımıyla, kurumların sürekli gelişimine ve başarısına katkı sağlayabilir.

6 Conclusion

This paper focuses on structuring the quality assurance system (QAS) in a developing state university through a strategic management-based model. A review of the literature revealed a gap in QAS models specifically designed for newly established and developing universities. To address this gap, a novel QAS model based on stakeholder-driven, systematic, and strategic approaches, utilizing principles from the engineering discipline, has been developed within the scope of the paper.

The proposed model aims to ensure continuous improvement and quality assurance by employing the Plan-Do-Check-Act (PDCA) cycle philosophy from an engineering perspective. In addition to fostering continuous improvement, the model contributes to the long-term sustainability of the university's quality assurance system, ensuring both efficient use of current resources and the fulfillment of future quality requirements. The model allows for sustainable development by integrating systematic feedback loops based on stakeholder satisfaction. This approach not only focuses on short-term improvements but also establishes a sustainable quality management structure that supports the university's long-term strategic goals. To test the applicability and effectiveness of the model, satisfaction surveys were conducted with four different stakeholder groups-academic staff, administrative staff, students, and external stakeholders-at a state university established in 2018. Factor and regression analyses of the survey data revealed that the model had a positive impact on stakeholder satisfaction and significantly increased overall satisfaction.

The analyses also showed that the factors influencing satisfaction vary among different stakeholder groups. For academic staff, "Institutional Governance" and "University Facilities" were identified as the most influential factors, while for administrative staff, "Institutionalization" and "University Facilities" were key. For students, the most critical factors were "University Governance" and "Institutionalization." These findings provide important insights for university management on which areas to prioritize to ensure the sustainability of QAS and enhance stakeholder satisfaction.

The results suggest that newly established and developing higher education institutions should adopt a strategic approach when structuring and improving their QAS. The proposed model offers a roadmap for such institutions, while the stakeholder satisfaction surveys and analyses can help universities identify their specific needs and tailor their QAS accordingly. This model not only maintains current quality standards but also provides a structure that enhances the university's competitive strength and helps achieve its future quality goals. The model's alignment with engineering principles of process improvement and resource optimization supports the sustainability of quality objectives by increasing institutional competitiveness. Furthermore, it promotes sustainability by facilitating adaptation to technological advancements and integrating digital transformation into quality processes. In this way, higher education institutions can maintain existing quality standards while also developing a flexible structure capable of meeting future demands.

This paper fills a significant gap in the literature by presenting a quality assurance model specifically designed for newly established and developing universities. The proposed model integrates engineering-based systematic approaches, strategic management principles, and data-driven decision-making mechanisms to introduce an innovative perspective to quality management processes. Although numerous studies on quality assurance systems exist in the literature, there is a lack of research that develops a comprehensive, stakeholder satisfaction-based analytical model utilizing factor analysis and regression models, integrated with strategic management and sustainability principles. In this regard, this paper provides an applicable and scalable framework for both academic research and the structuring of quality assurance processes in higher education institutions.

As this paper was conducted at a single state university, the generalizability of the findings to other higher education institutions may be limited. Future research could test the model's generalizability through studies conducted at different universities and among various stakeholder groups. Additionally, qualitative research methods could be used to gain deeper insights into stakeholder satisfaction and evaluate the long-term effects of the model.

In conclusion, this paper makes significant contributions to the field of quality assurance in higher education. The strategic management-based QAS model, supported by engineering principles, can help newly established and developing universities manage their quality processes more effectively and efficiently. Furthermore, its systematic, stakeholder satisfaction-focused approach can contribute to the continuous development and success of institutions.

7 Teşekkür

Çalışmamız süresince bizlere yol gösteren ve katkı sağlayan tüm kişi ve kurumlara teşekkür ederiz. Özellikle vizyonu ve destekleriyle sürece değerli katkılarda bulunan Tarsus Üniversitesi Kurucu Rektörü Prof. Dr. Orhan Aydın'a ve uygulama aşamasında desteklerini esirgemeyen Rektör Yardımcısı Prof. Dr. Ali Deran'a şükranlarımızı sunarız. Ayrıca, yapıcı değerlendirmeleriyle çalışmamızın gelişimine katkıda bulunan değerli hakemlere ve Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi editör kuruluna da içten teşekkür ederiz.

8 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen bu çalışmada Mustafa Egemen Taner modelin kurgusunu oluşturarak çalışmaya %50 katkı sağlarken, Samet Sadırlı anket uygulaması ve analiz çalışmalarını gerçekleştirerek çalışmaya %50 katkı sağlamıştır. Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çakışması olmamıştır.

9 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur". "Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır".

10 Kaynaklar

[1] Çelik Z. "Bologna süreci'nin Avrupa Yükseköğretim sistemi üzerine etkileri". *Yükseköğretim ve Bilim Dergisi*, 2, 100-105, 2012.

[2] Almussalam A. "Accreditation and quality assurance in post secondary education in the Kingdom of Saudi Arabia". *Yükseköğretim ve Bilim Dergisi*, 3, 193-199, 2013.

[3] Miliani M. "Building congruence between ınternal quality assurance and external quality assessment: the Algerian experience". *Yükseköğretim ve Bilim Dergisi*, 3, 200-204, 2013.

[4] Koçdar S, Kapar N. "Türkiye'de açık ve uzaktan öğrenme programlarının akreditasyonu: uygulamalar, sorunlar ve çözüm önerileri". *Yükseköğretim ve Bilim Dergisi*, 3, 494-503, 2017.
[5] Şenol Y, Akyüz G, Apaydın Ç, Başaran SC, Özdemir B, Gürpınar E, Ünal M. "Eğitimde mükemmellik merkezi hizmetlerinin logic modelle değerlendirilmesi". *Yükseköğretim ve Bilim Dergisi*, 12(1), 1-9, 2022.
[6] Taştan K, Yılmaz S. "Kalite yönetimi uyma ölçeğinin yükseköğretim için işlemselleştirilmesi: yükseköğretimde kalite yönetimi uyma ölçeği". *Yükseköğretim ve Bilim Dergisi,* 12(3), 573-587, 2022.
[7] Yanmaz Arpacı Ö, Coşkun S, Taner ME, Aydınlı M. *Yükseköğretimde kalite güvencesi: bir devlet üniversitesinde kalite yönetim sistemi uygulamaları*. Editörler: Kara IU, Karalar S. Kalite ve Strateji Yönetimi Araştırmaları, 383-411, Edirne, Türkiye, Trakya Üniversitesi Yayınları, 2022.
[8] Hamutoğlu NB, Ünveren ENB, Elmas M. "Thematic analysis of status reports made within the scope of higher education assessment and quality assurance: the comparative case of England and Türkiye". *Yükseköğretim Dergisi*, 12(Supplement), 99-110, 2022.
[9] Taner ME. *Yeni kurulan bir devlet üniversitesinde kalite güvencesi sistemi yapılandırılması*. Editörler: Kara IU, Karalar S. Kalite ve Strateji Yönetimi Araştırmaları, 279-307, Edirne, Türkiye, Trakya Üniversitesi Yayınları, 2022.
[10] Gökbel H, Güleş HK, Akgemci T, Kuzu ÖH. "Yükseköğretimde dönüşen değerler bağlamında stratejik yönetim bakış açısı geliştirilmesi: Selçuk Üniversitesi stratejik yol haritası belirleme örneği üzerine karşılaştırmalı bir inceleme". *Yükseköğretim Dergisi*, 2(3), 167-178, 2012.
[11] Cevher E, Yuksel H. "In regards to higher education strategy, assessment of educational activities in public universities: the case of Turkey". *Eurasian Journal of Educational Research*, 61, 237-256, 2015.
[12] Kapucugil Aİ, Özdağoğlu G, Damar M, Yaparel R, Arbak Y, Tuncel E, Karapinar I, Ozler C. "Stratejik planlamanın önemli bir girdisi olarak öğrenci memnuniyetinin ölçümü: Dokuz Eylül Üniversitesi örneği". *Yükseköğretim ve Bilim Dergisi*, 7(1), 28-40, 2017.
[13] Özcan B, Kalaycı N, Li T. "A comparative analysis of the ınstitutional quality evaluation processes in Turkish, European, and American Higher Education Systems". *Yükseköğretim Dergisi*, 12(Supplement), 85-98. 2022.
[14] Önen SM, Uysal G. "Yükseköğretim kurumlarında stratejik planlama: Doğu Anadolu Bölgesi Üniversitelerinde karşılaştırmalı bir analiz". *Uluslararası Yönetim Akademisi Dergisi*, 4(1), 63-79, 2021.
[15] Tarakcıoğlu AA, Marşap B, Demirel BL. "Applicability of integrated reporting in higher education institutions: a comparative analysis of integrated reports published by higher education institutions in the world". *Yükseköğretim Dergisi*, 12(1), 24-38, 2022.
[16] Uğurlu Z. "Social network analysis of farabi exchange program: student mobility." *Eurasian Journal of Educational Research*, 65, 313-334, 2016.
[17] Olgun MO, Özdemir G. "Önem-memnuniyet analizi ve taguchi metodu ile eğitimde iyileştirme önceliklerinin belirlenmesi: bir uygulama örneği". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(2), 81-87, 2013.
[18] Damar M, Kapucugil Aİ, Özdağoğlu G, Özler C, Arbak Y, Tuncel P, Karapınar İ, Yaparel R. "Ders değerlendirme sürecinde öğrenci geribildirim sisteminin tasarımı: Dokuz Eylül Üniversitesi örnek olay çalışması". *Yükseköğretim ve Bilim Dergisi*, 1, 78-90, 2017.
[19] Ömürgönülşen M, Eryiğit C, Özkan ÖT, Soysal M. "Enhancing the quality of a higher education course: quality function deployment and kano model integration". *Yükseköğretim Dergisi*, 10(3), 312-327, 2020.
[20] Tekindal MA, Bulduklu Y, Çoban B, Köse S, Elmalı F. "Yükseköğretim kurumları memnuniyet ölçümü için yapısal form: İKÇÜ memnuniyet anketi geçerlik-güvenirlik analizleri". *Yükseköğretim Dergisi*, 12(1), 168-186, 2022.
[21] Sadırlı S. Yükseköğretim Kalite Güvencesi Modeli: Yeni Kurulan Bir Devlet Üniversitesinde Uygulamalar. Yüksek Lisans Tezi, Tarsus Üniversitesi, Mersin, Türkiye, 2023.
[22] Taner ME, Sadırlı S. "Yeni kurulan devlet üniversitelerinde kalite güvence sistemi yapılandırma çalışmaları ve karşılaşılan sorunlar". *International Quality Conference*, Lefkoşa, KKTC, 26-27 Temmuz 2022.
[23] Seyfried M, Pohlenz P. "Assessing quality assurance in higher education: managers' perceptions of effectiveness". *European Journal of Higher Education*, 8, 258-271, 2018.
[24] Çağlar A, Gülel FE, Yanmaz Arpacı Ö, Taner ME. "Yükseköğretim kurumunda iç paydaş memnuniyet analizi: Pamukkale Üniversitesi örneği". *Pamukkale Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 44, 231-250, 2015.
[25] Gökaşar I, Buran B, Dündar S. "Kent içi otobüs memnuniyet anketi verileri ve faktör analizinden yararlanılarak otobüslerin hizmet kalitesinin modellenmesi: İETT örneği". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(6), 1079-1086, 2018.
[26] Morrison, DF. *Multivariate Statistical methods*. 3rd ed. New York, USA, McGraw-Hill, 1990.
[27] Nakip M. *Pazarlama Araştırma Teknikleri ve (Spss Destekli) Uygulamaları*. 4. Baskı. Ankara, Türkiye, Seçkin Yayınevi, 2006.
[28] Altunışık R, Coşkun R, Bayraktaroğlu S, Yıldırım E. *Sosyal Bilimlerde Araştırma Yöntemleri.* 10. Baskı. Sakarya, Türkiye, Sakarya Kitabevi, 2005.
[29] Yılmaz V, Aktaş C, Arslan MST. "Müşterilerin kredi kartına olan tutumlarının çoklu regresyon ve faktör analizi ile incelenmesi". *Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 12(22), 127-139, 2009.

Ek A

Anketlerdeki Önermeler	
1. Yükseköğretimde Öğrenci Yaşamından Memnuniyet	
1.1	Öğrenci işleri hizmetlerinden memnunum.
1.2	Bilgi işlem hizmetlerinden (teknik destek, e-posta servisi, bilgisayar laboratuvarı vb.) memnunum.
1.3	Öğrenci topluluklarının faaliyetlerini yeterli buluyorum.
1.4	Kültür, sanat ve spor faaliyetlerinden memnunum.
1.5	Uluslararası ilişkiler ofisinin sunduğu hizmetlerden (Erasmus+, Mevlâna, Farabi) memnunum.
1.6	Kariyer planlaması konusunda sunulan hizmetlerden memnunum.
1.7	Yerleşkedeki öğrencilik yaşamımdan memnunum.
1.8	Kütüphane hizmetlerinden memnunum.
1.9	Temizlik hizmetlerinden memnunum.
1.10	Güvenlik hizmetlerinden memnunum.

	2. Liderlik, Yönetişim ve Kalite
2.1	Akademik/İdari personele sunulan kendini geliştirme/hizmet içi eğitim olanaklarından memnunum.
2.2	Stratejik Planın uygulanma süreçleri yeterli düzeydedir.
2.3	Görüşlerimi yönetime iletebileceğim tanımlı mekanizmalar mevcuttur.
2.4	Üniversitemizin kurumsallaşma anlayışından memnunum.
2.5	Bilgi yönetim sistemi (e-kampüs) uygulamalarını etkin buluyorum.
2.6	Akademik personel arasındaki iş birliği yeterli düzeydedir.
2.7	İdari personel ile olan iletişim yeterli düzeydedir.
2.8	Öğrenciler ile olan iş birliği yeterli düzeydedir.
2.9	Üniversite yönetimi profesyonel bir yönetim anlayışına sahiptir.
2.10	Bağlı olduğum yöneticilerim lider yöneticilerdir.
2.11	Kendimi Üniversitemin bir parçası olarak görüyor ve değerli hissediyorum.
2.12	Üniversitemiz politikalarından memnunum.
2.13	Bilimsel etkinlikler (webinar, söyleşi, panel vb.) yeterli düzeydedir.
2.14	Üniversite Yönetimi tarafından gerçekleştirilen bilgilendirme toplantılarını yeterli buluyorum.
2.15	Üniversitemizin kurum kültüründen memnunum.
2.16	Çalıştığım ortamın fiziksel şartlarını (iklimlendirme, aydınlatma, bina tasarımı) yeterli buluyorum.
2.17	Çalıştığım ortamın donanımsal koşullarını (bilgisayar, yazıcı, büro malzemeleri vb.) yeterli buluyorum.
2.18	Kültür ve sanat faaliyetlerinden memnunum.
2.19	Sosyal tesislerin (yemekhane) hizmetlerinden memnunum.
2.20	Kantin hizmetlerinden memnunum.
2.21	Birimimizdeki idari personelin hizmetlerinden memnunum.
2.22	Bilgi işlem hizmetlerinden (teknik destek, bilgisayar laboratuvarı vb.) memnunum.
2.23	Bilgi ve İletişim Ofisinin faaliyetlerinden memnunum.
2.24	Uluslararası İlişkiler Ofisinin sunduğu hizmetlerden (Erasmus+, Mevlâna, Farabi) memnunum.
2.25	Yapım onarım hizmetlerinden memnunum.
2.26	Temizlik hizmetlerinden memnunum.
2.27	Birimimizdeki idari personel sayısı yeterlidir.
2.28	Görev ve sorumluluklarımın yetkinliklerime uygun olduğunu düşünüyorum.
2.29	Birimimizdeki iş yükü dağılımı dengelidir.
	3. Eğitim ve Öğretim
3.1	Bölümümüzdeki eğitim programının iş dünyasının gereksinimlerini karşıladığını düşünüyorum.
3.2	Karma/Hibrit eğitim-öğretim uygulamalarını etkin ve verimli buluyorum.
3.3	Ders sorumlularına kolaylıkla ulaşabiliyorum.
3.4	Derslik ve laboratuvar gibi eğitim alanlarını ve bu alanlardaki teknolojik araçları yeterli buluyor.
3.5	Bölümümüzdeki yan dal, çift anadal, ortak dersler vb. imkanlardan memnunum.
3.6	Akademik danışmanımla olan iletişimimden memnunum.
3.7	Sınav, ödev, proje gibi değerlendirme yöntemlerini yeterli buluyorum.
3.8	Toplantı, söyleşi ve webinar gibi faaliyetleri geleceğim açısından faydalı buluyorum.
3.9	Bölümümüzdeki Erasmus+, Mevlâna ve Farabi imkanları yeterlidir.
3.10	Dezavantajlı, kırılgan ve az temsil edilen gruplara yönelik hizmetleri yeterli buluyorum.

	4. Araştırma ve Geliştirme
4.1	Araştırma ve geliştirme faaliyetleri Üniversitenin öncelikli alanları (uluslararası ticaret ve lojistik, finans, ileri ve akıllı imalat) ile uyumludur.
4.2	Birimimizde uluslararası iş birlikleri ile yürütülen Ar-Ge faaliyetleri yeterli düzeydedir.
4.3	Kütüphane tarafından sunulan araştırma olanakları beklentilerimi karşılamaktadır.
4.4	Üniversitemde bilimsel araştırma projelerine (BAP) verilen desteklerden memnunum.
4.5	Araştırma ve geliştirme çalışmalarına yönelik özendirici uygulamalardan (teşvik, ödül, kurum dışı görevlendirme vb.) memnunum.
4.6	Araştırma ve geliştirme ile eğitim-öğretim faaliyetleri arasındaki etkileşim yeterli düzeydedir.
4.7	Araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin sürdürülmesinde paydaşlarla (endüstri, kamu kurum ve kuruluşlar, sivil toplum kuruluşları vb.) kurulan ilişkiler yeterli düzeydedir.
4.8	Araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin sonuçlarının kurumsal ve toplumsal faydaya dönüşümü yeterli düzeydedir.
4.9	Proje Ofisinin sunduğu hizmetler beklentilerimi karşılamaktadır.
	5. Toplumsal Katkı
5.1	Toplumsal katkı faaliyetlerine ilişkin olanaklar yeterlidir.
5.2	Üniversitemizin toplumsal katkı faaliyetlerini yeterli buluyorum.
5.3	Eğitim-Öğretim ile toplumsal katkı faaliyetleri arasındaki etkileşim yeterli düzeydedir.
5.4	Ar-Ge ile toplumsal katkı faaliyetleri arasındaki etkileşim yeterli düzeydedir.
5.5	Topluma yönelik sunulan hizmetlerin duyurulması ile ilgili araç ve mekanizmalar yeterlidir.
5.6	Üniversitemiz, ülkemizin gelişimi ve kalkınmasına katkı sağlar.
	6. Temel Değer Analizi
6.1	***** Üniversitesi birimleri ile sürdürdüğüm ilişkiden memnunum.
6.2	***** Üniversitesi personeli güler yüzlüdür.
6.3	***** Üniversitesi personeli işinde etkin ve verimlidir.
6.4	***** Üniversitesi personeli iş ve işlem hakkında yeterli bilgi sahibidir.
6.5	***** Üniversitesi personeli sorularınıza / taleplerinize detaylı / anlaşılır cevap verir.
6.6	***** Üniversitesi adaleti gözetir.
6.7	***** Üniversitesi liyakati esas alır.
6.8	***** Üniversitesi istişarede bulunur.
6.9	***** Üniversitesi şeffaftır.
6.10	***** Üniversitesi etik değerlere bağlıdır.
6.11	***** Üniversitesi mükemmeliyetçi yaklaşıma sahiptir.
6.12	***** Üniversitesi sürekli iyileşmeye ve gelişmeye açıktır.
6.13	***** Üniversitesi yenilikçidir.
6.14	***** Üniversitesi özgündür.
6.15	***** Üniversitesi yerele odaklıdır.
6.16	***** Üniversitesi küresel rekabeti hedefler.
	7. Üniversiteye Yönelik Genel Algı Düzeyi
7.1	***** Üniversitesi, paydaşlarının görüş ve önerilerine önem vermektedir.
7.2	***** Üniversitesi, kurumsal kimliği ile bölgede saygın bir imaja sahiptir.
7.3	***** Üniversitesi, sürdürülebilir büyüme ve gelişim göstermektedir.
7.4	***** Üniversitesi, ortak proje geliştirme gibi üretken iş birliklerine açıktır.

7.5	***** Üniversitesi, tanıtım faaliyetlerini etkin yürütmektedir.
7.6	***** Üniversitesi personelinin üniversite dışı etkinliklere katkı sağlama yetkinliği beklentileri karşılamaktadır.
7.7	***** Üniversitesinin dış paydaşlara sunduğu hizmetlerin kalitesi beklentileri karşılamaktadır.
7.8	***** Üniversitesi mezunları iş ve meslek yaşantısının gerektirdiği niteliklere sahiptir.
7.9	Üniversite adaylarına ***** Üniversitesini öneririm.
7.10	***** Üniversitesi akademik personeli, araştırma-geliştirme faaliyetlerinin yürütülmesi için gerekli niteliklere sahip, alanlarında uzman kişilerdir.
7.11	***** Üniversitesinin iş dünyasına yönelik sağladığı laboratuvar hizmetleri yeterli düzeydedir.
7.12	***** Üniversitesinin sanayi ile etkileşimli olarak gerçekleştirdiği araştırma ve geliştirme faaliyetleri beklentileri karşılamaktadır.
7.13	***** Üniversitesinin, araştırma-geliştirme faaliyetleri ile topluma katkı sağladığını düşünüyorum.
7.14	***** Üniversitesi, gerçekleştirdiği bilgilendirme faaliyetleri (eğitimler, çalıştaylar, kongreler, seminerler, webinarlar vb.) ile topluma katkı sağlamaktadır.
7.15	***** kentinin gelişmesinde, ***** Üniversitesi'nin etkin bir rolü bulunmaktadır.
	8. Genel Memnuniyet
8.1	Genel olarak Üniversitemizden memnunum.

Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 31(7), 1211-1224, 2025

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Çift üstel düzeltme, ARIMA ve yapay sinir ağları ile kısa mesaj miktarının tahmini

Forecasting the short message quantity with double exponential smoothing, ARIMA and artificial neural networks

Mehtap Parlak[1], *Gonca Yıldırım*[2*]

[1]Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
mehtap.parlak@gazi.edu.tr
[2]Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
goncayildirim@gazi.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 30.12.2024 Düzeltme Tarihi/Revision: 06.04.2025 doi: 10.5505/pajes.2025.91586
Kabul Tarihi/Accepted: 12.05.2025 Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Günümüzde hala farklı sektörlerde ve bireyler arasında yaygın olarak kullanılan ve mobil iletişimde önemli bir yere sahip olan kısa mesaj servisi, çeşitli sektörlerdeki işletmelere operasyonel verimlilik, pazarlama ve müşteri hizmetlerine yönelik geliştirilen stratejiler gibi çok farklı alanlarda faydalar üretmektedir. Bu çalışmada, çift üstel düzeltme, ARIMA ve yapay sinir ağları kullanılarak kısa mesaj servisi için miktar tahmini ve ortalama mutlak yüzde hata ve ortalama kare hatası kullanılarak elde edilen tahminlerin karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışmada, yapay sinir ağları en yüksek tahmin doğruluğunu vermiş, bunu çift üstel düzeltme yöntemi ve en son olarak ARIMA yöntemi izlemiştir. Tahmin hatalarının tek yönlü ANOVA karşılaştırmaları, yapay sinir ağları ile çift üstel düzeltme yöntemi arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğuna dair yeterli kanıt sağlamamaktadır. Ancak, ARIMA yöntemi her iki yönteme kıyasla önemli ölçüde daha kötü performans göstermektedir. Deneyler sonucunda elde edilen bir diğer bulgu; katman, nöron ve epok (öğrenme döngüsü) sayılarının artmasının yapay sinir ağlarının tahmin performansını genel olarak iyileştirdiği yönündedir. Ayrıca çalışmada, yapay sinir ağının çıktı katmanında kullanılan sigmoid aktivasyon fonksiyonunu düzeltilmiş doğrusal birim, hiperbolik tanjant ve doğrusal fonksiyonlarıyla değiştirilerek yapılan denemeler sonucunda doğrusal fonksiyonunun daha iyi performans gösterdiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Zaman serileri tahmini, Çift üstel düzeltme, ARIMA, Yapay sinir ağları, SMS.

Abstract

The short message service, which is still widely used to this day in different sectors and among individuals and has an important place in mobile communication, provides benefits to businesses in various sectors in many different areas, such as operational efficiency, marketing, and customer service strategies. In this study, double exponential smoothing, ARIMA, and artificial neural networks are used to forecast the short message quantity, and mean absolute percentage error and mean squared error measures are used to compare the forecasts. In this study, the artificial neural networks yield the highest forecast accuracy, followed by double exponential smoothing and, lastly, the ARIMA method. One-way ANOVA comparisons of forecast errors do not provide sufficient evidence to declare a statistically significant difference between artificial neural networks and the double exponential smoothing method. However, ARIMA method performs significantly worse than both. Another finding obtained as a result of the experiments is that increasing the number of layers, neurons, and epochs (learning cycles) improves the forecasting performance of artificial neural networks in general. Additionally, the experiments done by replacing the sigmoid activation function used in the output layer of the neural network with rectified linear unit, hyperbolic tangent, and linear functions showed that the linear function performs better.

Keywords: Time series forecasting, Double exponential smoothing, ARIMA, Artificial neural networks, SMS.

1 Giriş

Mobil haberleşmenin önemli yapı taşlarından birini oluşturan kısa mesaj servisi (SMS) günümüzde elektronik bankacılığa giriş yapılabilmesinde, işletmelerin kampanyalarıyla ilgili müşterileriyle iletişime geçmesinde, sağlıkla ilgili randevu hatırlatma ve reçete bilgilendirmesinin yapılmasında, bir etkinlik alımı sonucunda müşterilere onay bilgilerinin gönderilmesinde, vergi ve yasal bildirimler gibi kamusal hizmetlerle ilgili vatandaşların bilgilendirilmesinde, satın alınan ulaşım biletlerinin onaylarının iletilmesinde, e-ticaret kapsamında satın alma sürecinin ödeme doğrulama aşamasında ve daha birçok farklı alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. SMS'yle sadece bireyler arasındaki değil, aynı zamanda işletmelerin müşterileriyle olan iletişimi de sağlanmaktadır.

Finans, pazarlama, ticaret, sağlık, eğitim ve kamusal hizmetler gibi sektörler için kritik öneme sahip SMS miktarının tahmini ile telekomünikasyon sektöründe faaliyet gösteren işletmeler müşteri stratejilerini daha kolay belirleyebilmektedir. SMS miktarının doğru tahmini sayesinde kaynakları etkin kullanmak, müşteri memnuniyetini artırmak ve daha iyi yatırım planları yapmak mümkün olabilir. Ayrıca, tahmin bulguları müşteri ilişkileri yönetimi (CRM) ve dijital pazarlama gibi alanlarda da kullanılabilir. CRM kapsamında, doğru SMS talep tahmini işletmelerin müşteri iletişim stratejilerini optimize etmelerine yardımcı olarak promosyon veya işlem mesajlarının en etkili zamanlarda gönderilmesini sağlayabilir. Dijital pazarlama açısından ise zamanlaması iyi ayarlanmış kampanyalar oluşturulmasına katkıda bulunarak müşteri etkileşimini ve dönüşüm oranlarını artırabilir.

*Yazışılan yazar/Corresponding author

Türkiye'de gönderilen SMS sayısı düşüş eğilimindedir (Şekil 1). Bu düşüş eğiliminin önemli sebeplerinden birisi internet tabanlı mesajlaşma uygulamalarının artan popülaritesidir [1]. Ayrıca, internet kullanımının yaygınlaşması ile SMS ve MMS'yi birleştirerek farklı marka telefonlar/servis sağlayıcılar arasındaki mesajlaşmayı daha kaliteli ve ek özelliklerle sunabilecek yeni teknolojiler de gündemdedir. Bunlardan, Zengin İletişim Hizmetlerinin (RCS) gelecek yıllarda benimsenme oranlarının daha da artacağı öngörülmektedir [2]. Dolayısıyla, hem servis sağlayıcıların altyapı geliştirme ve modernizasyonu ile yeni teknolojilere yatırımlarını planlamalarında hem de diğer sektörlerin dijital pazarlama stratejilerini belirlemelerinde mesajlaşma eğilim ve trendlerini analiz etmelerinin önemi artarak sürmektedir.

Bu çalışmada, SMS sayısının tahmini için gerçek veriler kullanılarak verinin yapısına uygun klasik tahmin modellerinden çift üstel düzeltme ile ARIMA'nın yanı sıra özellikle son zamanlarda literatürde oldukça sık olarak karşılaşılan makine öğrenmesi modellerinden yapay sinir ağları kullanılmıştır. Bu modeller için en iyi parametre değerleri belirlenerek tahminler gerçekleştirilmiş ve modellerin performansları karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın devamı şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 2'de bazı geçmiş tahmin çalışmalarına değinilerek literatüre katkılar anlatılmıştır. Bölüm 3'te, çalışmadaki girdiler, veriler, performans ölçütleri, aktivasyon fonksiyonları ve tahmin için kullanılan yöntemler ile uygulamaları verilmiştir. Bölümler 4 ve 5'te sonuçlar ele alınarak çalışma sonlandırılmıştır.

2 Geçmiş çalışmalar

Literatürde tahminleme konusu üzerine çok farklı alanlarda yapılmış olan çalışmalar bulunmaktadır. [3]'te ürün talep, [4]'te trafik kazası ve yaralı sayıları, [5]'de şeker üretiminde kalite kontrol kriterlerinden biri olan çözelti rengi, [6]'da 112 Acil Çağrı Merkezine gelebilecek çağrı sayısı, [7]'de COVID-19 pandemi döneminde bir üçüncü parti lojistik firmasının talep tahminleri için çeşitli klasik istatistiksel ve makine öğrenmesi yöntemleri kullanılmıştır. Bu çalışmanın konusu olan SMS miktarı gibi telekomünikasyon sektörü için kritik öneme sahip değişkenlerin tahminine yönelik geçmiş çalışmalar incelenerek Tablo 1'de özetlenmiştir. Çalışmalarda kullanılan kısaltmalar Ek Tablo A.1'de verilmiştir.

Tablo 1'de özetlenen telekomünikasyon sektörüne ait çalışmalardan [8]'de kullanılan özellikler mobil şebeke sistemlerindeki teknik bilgilerden oluşmaktadır. Öznitelik seçimi, korelasyon ve sıralama kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada, değişik eğitim-test oranları incelenmemiştir. [9]'da ARIMA için parametre optimizasyonu yapılmış ancak farklı modeller incelenmemiştir. [10]'da YSA türevlerinden olan LSTM ve RNN gibi derin öğrenme modellerinde, hücre ve gizli katman sayıları için parametre değerleri belirlenmiştir. Ancak eğitim-test oranı tek bir değerde sabit bırakılmıştır. [11]'de, basit yapılı bir YSA üzerinde bir özellik ve bir eğitim-test oranı kullanılarak tahmin gerçekleştirilmiş, farklı yöntemlerle karşılaştırma ve hata analizi yapılmamıştır. [12]'de YSA ve LSTM modellerinin benzer performans gösterdiği, ancak YSA'nın çalışma süresinin LSTM'ye göre çok daha düşük olduğu vurgulanmıştır. Çalışmamızla en ilgili olan [16]'da SMS, arama ve internet hizmetlerine ilişkin trafik tahminleri tarihsel ortalama, çeşitli makine ve derin öğrenme yöntemleri kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada, ConvLSTM-GNN hibrit modeli en iyi performansı göstermiştir. Ancak, modellerde kullanılan parametrelerin optimizasyonu yapılmamış, bunlar baştan sabitlenerek tahminler üretilmiştir.

Tablo 1. Telekom sektöründeki bazı tahmin çalışmaları.

Table 1. Some forecasting studies in the telecommunication sector.

Çalışma	Hedef değişken	Yöntemler	Metrikler	Veri	En iyi yöntemler
[8], 2016	Şebeke hücresindeki aktif kullanıcı sayısı	MLP/MLPWD/SVM	MAPE/RMSE	25.01.2015-31.01.2015, 168 adet veri (Deney 1: 24 özellik, Deney 2: 1 özellik)	Deney 1: SVM Deney 2: MLPWD
[9], 2016	Mobil abone sayısı	ARIMA	AIC/MAD/MAPE/RMSE/SBC	2000-2014, yıllık 15 adet veri	ARIMA (1,2,1)
[10], 2017	Mobil internet trafiği	RNN/3D CNN/CNN-RNN/ARIMA (STL)/LM (STL)/RNN (MTL)/3D CNN (MTL)/CNN-RNN (STL)/CNN-RNN (MTL)	MAE/MAPE/RMSE	Kasım-Aralık 2013, 6 farklı zaman dilimi için onar dakikalık veriler*	CNN-RNN
[11], 2021	GSM kullanıcı sayısı	MLP	MSE/RE	Aralık 2008-Ağustos 2020 yıllık 140 adet veri	-
[12], 2022	Deney 1: İnternet trafik hacmi Deney 2: Ortalama giden ve gelen trafik ayrımında internet trafik hacmi	YSA/LSTM/ARIMA/SMA	MAE/MAPE/MSE/RMSE/R^2	Deney 1: 07.07.2005-28.07.2005, Deney 2: 15.06.2021-15.07.2021, beşer dakikalık veriler*	Deney 1: YSA Deney 2: LSTM
[13], 2024	Mobil şebeke trafiği	HA/SVR/FNN/STGCN/ASTGCN/Graph-WaveNet/HGCN/HSeq2Seq	MAE/RMSE	23.12.2019-5.1.2020 beşer dakikalık veriler*	HSeq2Seq
[14], 2024	5G hücresel şebekelerin verimliliği	LSTM/BiLSTM/YSA/RF	MSE/R^2	35 farklı veri kümesi*	BiLSTM, LSTM
[15], 2024	Uydu iletişimindeki trafik talebi	Seq2Seq-LSTM	MAE/MSE	14 günlük 5555 adet veri	-
[16], 2024	SMS, arama ve internet trafiği	Son değer/HA/STCnet/GASTN/STAGCN/DMFSMF/Conv3D/ConvLSTM/ConvGRU/ConvLSTM-GNN/Stdense net	MAE/RMSE/R^2	01.11.2014-01.01.2023, onar dakikalık veriler*	ConvLSTM-GNN
Bu çalışma	SMS miktarı	DES/ARIMA/YSA	MAPE/MSE/Kruskal-Wallis	2009, 3. üç aylık dönem-2023, 4. üç aylık dönem, 58 adet veri	YSA ve DES

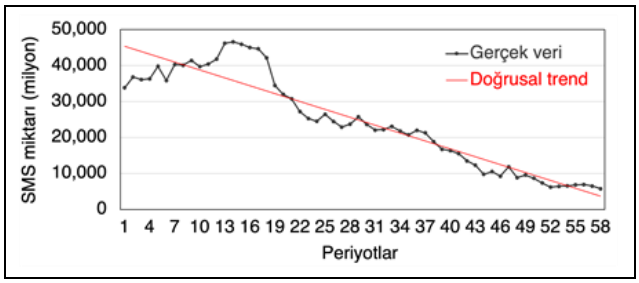
*: Net veri adeti belirtilmemiştir.

Yazarların bilgisi dahilinde bu çalışmaya benzer başka bir çalışmaya literatürde rastlanılmamış olup katkılarımız aşağıda özetlenmiştir:

- Veri yapısına uygun tahmin modelleri belirlenerek model performansları MAPE ve MSE metrikleriyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, modellerin tahminleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olup olmadığı test edilerek çalışmanın bulguları daha objektif hale getirilmiştir,
- YSA modeliyle tahmin performansını iyileştirebilmek için alana özgü 15 girdi belirlenerek gerçek veriler toplanmıştır. Raporlanmış verinin bütününde zamansal harmoniyi oluşturabilmek için yıllık miktar olarak yayımlananları doğrusal interpolasyon yaklaşımıyla, orantısal olanları seçilen periyotta aynı olacak şekilde düzenlenmiştir,
- YSA modelinin kurulması aşamasında RFE özellik seçimi yapılarak sıralamalar belirlenmiş, her özellik sayısı için denemeler yapılmış ve girdilerden hedef değişkenle en ilgili olanları bu sayede belirlenmiştir. Özellik seçiminde ikili bir süreç yürütülerek özelliklerin hem ham değerleri hem de birinci dereceden farkları kullanılmıştır.
- Modeller için parametre optimizasyonu yapılmış, özellikle YSA modelinde parametre değerlerinin tahminlere etkileri duyarlılık analiziyle incelenmiştir.

3 Veri kümesi ve yöntem

Bu bölümde, çalışmada kullanılan girdiler, veriler ve tahmin yöntemleri açıklanmaktadır. Şekil 1'de görüldüğü üzere SMS miktarının zaman serisi azalan bir trende sahiptir. Çalışmada, bu durum dikkate alınarak trende sahip zaman serilerinin tahmini için uygun olan çift üstel düzeltme yöntemi, ARIMA metodu ve YSA kullanılmıştır.



Şekil 1. Çeyrek dönemlerde gönderilen SMS miktarının zaman serisi ve trendi (2009, 3. çeyrek-2023, 4. çeyrek).

Figure 1. Time series plot and trendline of the quarterly SMS quantity sent (2009, 3rd quarter-2023, 4th quarter).

SMS miktarını etkileyebilecek 15 özellik belirlenerek Tablo 2'de listelenmiştir.

İlgili özelliklerden;

- Mobil abone sayısı, sadece mobil aboneliğe sahip bireylerin SMS hizmetinden yararlanabileceği;
- 2G ve 3G abone sayısı, 2G ve 3G teknolojisini kullanan bireylerin internet kullanımının 4.5G'yi kullanan bireylere göre daha az gerçekleşebileceği;
- H-TÜFE, haberleşme sektöründe gerçekleşen fiyatları, abonelikleri ve dolayısıyla işletmelerin sunduğu paket veya tarifelerin tercih edilmesini etkileyebileceği;
- Ulusal eğitim istatistikleri, SMS kullanımının eğitim durumundan ve nüfustan etkilenebileceği;
- SMS ve MMS gelir oranı, işletmelerin gelir oranı gibi stratejilerini önceden belirleyebilecekleri ve kendileri için daha önemli olan gelir türüne yönelik yatırımlarını planlayabilecekleri;
- Mobil genişbant abone sayısı, mobil internete sahip bireylerin sayısını göstermekte olup bu bireylerin mesajlaşma için SMS'yi daha az tercih edebilecekleri düşünceleriyle;
- Zamansal sıra, SMS'nin zaman serisi olması sebebiyle

seçilmiştir.

Tablo 2. SMS miktarını etkileyebilecek özellikler.

Table 2. Features that may affect the SMS quantity.

No.	Özellik
1.	Mobil abone sayısı
2.	2G ve 3G abone sayısı
3.	Haberleşme tüketici fiyat endeksi (H-TÜFE)
4.	Okuma yazma bilmeyen kişi sayısı
5.	Okuma yazma bilen fakat bir okul bitirmeyen kişi sayısı
6.	Ortaokul veya dengi mezunu kişi sayısı
7.	İlköğretim mezunu kişi sayısı
8.	Lise veya dengi meslek okulu mezunu kişi sayısı
9.	Yüksekokul veya fakülte mezunu
10.	Yüksek lisans mezunu kişi sayısı
11.	Doktora mezunu kişi sayısı
12.	Eğitim durumu bilinmeyen kişi sayısı
13.	SMS ve çokluortam mesaj hizmeti (MMS) gelir oranı
14.	Mobil genişbant abone sayısı
15.	Zamansal sıra

3.1 Verilerin elde edilişi

Çalışmada tahminler her üç aylık periyot için yapılmıştır. İlgili veriler, Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumunun üçer aylık periyotlarla yayımladığı Türkiye Elektronik Haberleşme Sektörü Üç Aylık Pazar Verileri Raporu ile Türkiye İstatistik Kurumu tarafından 2009 ile 2023 yılları arasında yayımladığı çalışmalardan elde edilen 58 periyotluk girdi ve çıktılardan oluşmaktadır ([17]-[19]). Ulusal eğitim istatistikleri yıllık olarak yayımlanmakta olup, çeyrek yıllık veriler bulunmamaktadır. Bu çalışmada, ulusal eğitim istatistiklerinin, yıl içindeki çeyrek yıllık periyotlarda büyük dalgalanmalar veya mevsimsel davranış göstermesi beklenmeyeceği varsayımı yapılmıştır. Dolayısıyla, yıllık verilerin üçer aylık dönemlere dönüştürülmesi işlemi doğrusal interpolasyonla yapılmıştır ([20],[21]). SMS ve MMS gelir oranı sadece o yıla ait olan ilgili gelirlerin tüm gelirlere oranını temsil ettiği için yıl boyunca sabit alınmıştır.

3.2 Özellik seçimi

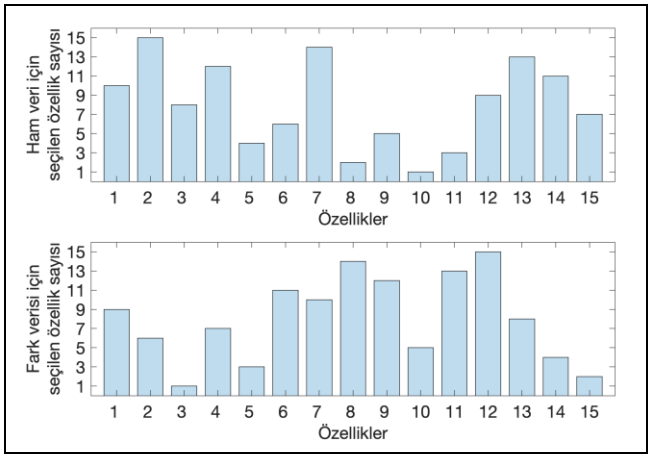
YSA modelinde kullanılmak üzere girdi olarak belirlenen özelliklerin yüksek korelasyona sahip oldukları belirlenmiştir. Tahmin performansının olumsuz etkilenmesini önlemek ve en iyi performansı veren özellikleri belirlemek için RFE yöntemiyle özellik seçimi yapılmıştır. RFE, özellikleri önem değerine göre sıralamak yerine en önemsizleri eler ve bunu istenen sayıda özellik kalana kadar yineler. RFE yöntemi herhangi bir makine öğrenme algoritmasını işleyebilme özelliğine sahiptir [22]. Bu duruma istinaden, çalışmadaki özellik seçimi için RFE rastgele orman tekniğiyle kurulmuş ve Python programlama dilinde kodlanarak uygulanmıştır. Rutin 1, ilgili sürecin sözde kodunu vermektedir.

Rutin 1. RFE yöntemiyle özellik seçiminin sözde kodu.

Routine 1. Pseudocode for feature selection with RFE.

```
Hem ham hem de 1. dereceden fark alınmış veriler için:
    Veri kümesini girdi ve çıktı değişkenleri için ayır.
    n girdi sayısı için (n-1)'den 1'e kadar:
        Rastgele orman tekniğini kullanan RFE yöntemini uygula.
        Seçilen özellikleri raporla.
```

Özellik seçiminde iki veri kümesi kullanılmıştır. Bunlardan ilki tüm girdi parametrelerinin gerçek değerleri, diğeri ise SMS miktarının azalan bir trende sahip olmasına bağlı olarak tüm girdi değerlerinin birinci dereceden farklarının alınmasıyla oluşan değerlerdir. Özellik seçim süreci, önem düzeyi yüksek ilk 14 özelliğin belirlenmesiyle başlayıp tek bir özelliğin belirlenmesine kadar sürdürülmüştür. RFE yönteminin girdilere uygulamasını gösteren Şekil 2'de, dikey eksen özelliklerin sıralaması (ve sayısı), yatay eksen özelliklerin numaralarıdır.



Şekil 2. RFE yönteminin uygulanması.

Figure 2. Application of the RFE method.

İstenen özellik sayısına denk gelen çubuk yüksekliğinin altındaki özellikler seçilirken üstündeki özellikler elenir. Örneğin, tek bir özellik seçmek istenirse bu özellik, ham veriler kullanıldığında 10., birinci dereceden fark alınmış veriler kullanıldığında 3. özellik olur. Tablo 3, özelliklerin önem düzeylerini sıralı olarak göstermektedir.

Tablo 3. Özelliklerin RFE yöntemine göre önem sıralaması.

Table 3. Ranking of the features based on RFE.

Sıralama (önem düzeyi)	Ham Veri	Fark alınmış Veri
1	10	3
2	8	15
3	11	5
4	5	14
5	9	10
6	6	2
7	15	4
8	3	13
9	12	1
10	1	7
11	14	6
12	4	9
13	13	11
14	7	8
15	2	12

3.3 Özellik Normalizasyonu

Normalizasyon, kullanılacak özelliklerin ölçekleri arasında belirgin farklılıklar olduğunda verileri [0,1] veya [−1,1] aralıklarındaki değerlere dönüştürerek verilerin birbirleriyle karşılaştırılabilmesini sağlar ([23],[24]). Çalışmadaki veriler, literatürde sıklıkla kullanılan min-max normalizasyonuyla [0,1] aralığına sınırlandırılmıştır [25]. İlgili notasyon Tablo 4'te, formülasyon Denklem (1)'de verilmiştir [26].

Tablo 4. Min-max normalizasyonunda kullanılan notasyon.

Table 4. The notation used in the min-max normalization.

Sembol	Açıklama
X	Veri kümesi
min X ve max X	Veri kümesindeki en küçük ve en büyük değerler
x_i	Veri kümesindeki i. verinin gerçek değeri
x_i'	Veri kümesindeki i. verinin normalize edilmiş değeri

$$x_i' = \frac{x_i - \min X}{\max X - \min X} \tag{1}$$

3.4 Performans metrikleri

Literatürde, tahmin modellerinin performanslarının ölçülmesi ve karşılaştırılması için farklı hata metrikleri bulunmaktadır [27]. Bu çalışmada MAPE ve MSE tercih edilmiş ve ilgili metriklerin notasyonu Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Tahmin performans ölçümünde kullanılan notasyon.

Table 5. Notation used in the forecast error measures.

Sembol	Açıklama
D_i	i periyodundaki gerçek değer
F_i	i periyodundaki tahmin değeri
n	Periyot (gözlem) sayısı

3.4.1 Ortalama mutlak yüzde hata

MAPE, gerçek ve tahmin değerleri arasındaki farkın gerçek değere oranına dayalı olduğundan diğer metriklere göre daha objektif bir gösterge olarak kabul edililir. Veri ölçeğine duyarlı olmayan MAPE değeri sıfıra ne kadar yakınsa tahmin o kadar başarılıdır [28]. MAPE, Denklem (2) kullanılarak hesaplanır.

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{D_i - F_i}{D_i}\right| \tag{2}$$

MAPE, gerçek değerin üstündeki tahminlere, altındakilerden daha yüksek bir ceza uyguladığından, yüksek hataların beklendiği modellerde kullanımı eleştiri konusudur [29]. Bu sebeple, çalışmada ikinci bir metrik olarak MSE kullanılmıştır.

3.4.2 Ortalama kare hata

YSA'da girdilerin normalizasyona tabi tutulduğu modelden elde edilen çıktılar da normalize değerler verir. Hata hesaplaması yapabilmek için tahmin değerlerini tekrar gerçek değerlere dönüştürmek gerekir [30]. Bu çalışmada, veri değerlerini gerçek ölçekte ele almak ve MAPE metriğindeki olası dezavantajlardan korunmak için yaygın olarak kullanılan ve Denklem (3)'te formülü verilen MSE metriği tercih edilmiştir.

$$\text{MSE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(D_i - F_i)^2 \tag{3}$$

3.5 Aktivasyon fonksiyonları

Aktivasyon fonksiyonu, yapay sinir hücresinin giriş verilerini işleyerek bir çıktı değerinin üretilmesini sağlar. Fonksiyonun doğru şekilde seçilmesi modelin performansını doğrudan etkiler [31]. Bu seçim genelde veriye değil, deneylere bağlı olarak yapılır [32]. Sigmoid, ReLU, hiperbolik tanjant (tanh) ve doğrusal en sık kullanılan aktivasyon fonksiyonlarındandır.

3.5.1 Sigmoid

Sigmoid fonksiyonu, negatif değerleri sıfıra, büyük pozitif değerleri ise 1'e yaklaştırarak çıktıları [0,1] aralığındaki değerlere atar. Sigmoid, genelde sınıflandırma problemlerinin çıktısını modellemede kullanılmaktadır. Formülü Denklem (4)'te verilen sigmoid fonksiyonunun üstel işlem içermesinden dolayı hesaplama karmaşıklığı yüksektir ([33],[34]) ve çalışmamızda sadece çıktı katmanında kullanılmıştır.

$$\text{sigmoid}(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \tag{4}$$

3.5.2 ReLU

ReLU fonksiyonu, negatif girdi değerlerini sıfıra, pozitif girdi değerlerini kendisine döndürür [35]. Parçalı doğrusal bir fonksiyon olarak betimlenebilen ReLU'nun formülasyonu Denklem (5)'te verilmiştir. ReLU, pratikte iyi sonuç verdiği için sıklıkla tercih edilir ([32],[36]) ve çalışmamızda YSA'nın gizli katmanlarında kullanılmıştır.

$$\text{ReLU}(x) = \max\{0, x\} \tag{5}$$

3.5.3 Hiperbolik tanjant

Formülasyonu Denklem (6)'da verilen tanh aktivasyon fonksiyonu sigmoide benzer bir yapıya sahiptir, ancak çıktı değerleri $[-1,1]$ aralığındadır. Türevi sigmoide göre daha dik olduğundan daha geniş bir değer aralığı elde edilir [36].

$$\tanh(x) = \frac{2}{(1+e^{-2x})} - 1 \tag{6}$$

3.5.4 Doğrusal

Doğrusal aktivasyon fonksiyonu, yorumlanabilirlik gerektiren, girdi-çıktı ilişkisinin basit ve doğrusal olduğu durumlarda kullanılır. Denklem (7)'de verilen doğrusal aktivasyon fonksiyonundaki a çarpanının değerini kullanıcı belirler [37].

$$F(x) = ax \tag{7}$$

3.6 Yöntem

Bu çalışmada, ele alınan SMS miktarının azalan trend göstermesinden dolayı bu tür zaman serilerinin tahmini için uygun olan çift üstel düzeltme yöntemi, ARIMA metodu ve YSA kullanılmıştır. Tahmin modelleri Python programlama dilinde kodlanarak JupyterLab üzerinde çalıştırılmış, uygun parametre değerleri ile model yapıları belirlenmiştir. Modellerin karşılaştırılmaları MAPE ve MSE metrikleri, performanları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olup olmadığı da Kruskal-Wallis testi [38] kullanılarak yapılmıştır.

3.6.1 Çift üstel düzeltme yöntemi

Literatürde yaygın olarak kullanılan üstel düzeltme yönteminde, yakın tarihli gözlemlere eski gözlemlere göre daha fazla ağırlık verilir ([39],[40]). Bu yöntemin sıklıkla kullanılan üç türü basit üstel düzeltme, çift üstel düzeltme ve Holt-Winters'dır [41]. Çalışmamızdaki veri trende sahip olduğundan çift üstel düzeltme yöntemi kullanılmıştır. İlgili notasyon Tablo 6'da, formülasyonlar Denklemler (8)-(10)'da verilmiştir [42].

Tablo 6. Çift üstel düzeltme yönteminde kullanılan notasyon.

Table 6. Notation used in the double exponential smoothing method.

Sembol	Açıklama
S_t	t periyodundaki düzeltilmiş seviye değeri
D_t	t periyodundaki gerçek gözlemlenen değer
G_t	t periyodundaki trend değeri
α ve β	Üstel ve trend düzeltme parametreleri, $\alpha, \beta \in (0,1)$
$F_{t,t+\tau}$	t periyodunda τ adım sonraki tahmin değeri

$$S_t = \alpha D_t + (1-\alpha)(S_{t-1} + G_{t-1}) \tag{8}$$

$$G_t = \beta(S_t - S_{t-1}) + (1-\beta)(G_{t-1}) \tag{9}$$

$$F_{t,t+\tau} = S_t + \tau G_t \tag{10}$$

Çift üstel düzeltme yöntemiyle yapılan çalışmanın süreci Rutin 2'de verilmiştir.

Rutin 2. SMS sayısının çift üstel düzeltme yöntemiyle tahmini için sözde kod.

Routine 2. Pseudocode for forecasting the SMS quantity using the double exponential smoothing method.

Veri kümesini yükle.
G_0 değerini ilk 4 döneme göre hesapla.
S_0 değerini 4. gözlem değeri olarak al.
β = 0.1'den 1'e kadar 0.1'lik artışla:
  α = 0.1'den 1'e kadar 0.1'lik artışla:
    Her $t \in \{5,6,\dots,n\}$ için:
      S_t değerini Denklem (8)'le hesapla.
      G_t değerini Denklem (9)'la hesapla.
      $F_{t,t+\tau}$ değerini Denklem (10)'la hesapla.
      MSE ve MAPE değerlerini hesapla.

Üstel ve trend düzeltme paremetrelerinin (sırasıyla α ve β) değerleri 0.1'den başlayarak 0.1'lik artışla denenmiştir. Tablo 7'de özetlendiği gibi, en iyi α ve β değerleri sırasıyla; MAPE metriğine göre 0.8 ve 0.2, MSE metriğine göre 0.9 ve 0.2'dir.

Tablo 7. Çift üstel düzeltme için test edilen parametre kümesindeki en iyi sonucu veren parametre değerleri.

Table 7. Best parameter values in the set of those tested for the double exponential smoothing model.

α	β	MAPE	MSE
0.8	0.2	0.073790	4,395,378
0.9	0.2	0.074764	4,281,504

3.6.2 ARIMA metodu

Box-Jenkins yöntemi olarak da adlandırılan ARIMA, zaman serilerinde kullanılan bir diğer tahmin metodudur. Durağan olmayan ve fark alma gibi dönüşümlerle durağanlaştırılan zaman serilerinde kullanılır ([6],[9]). Model parametrelerinin belirlenmesinde, otokorelasyon ve kısmi otokorelasyon fonksiyonlarından yararlanılır. ARIMA ile ilgili notasyon Tablo 8'de, formülasyon Denklem (11)'de verilmiştir [43].

Tablo 8. ARIMA yönteminde kullanılan notasyon.

Table 8. Notation used in the ARIMA method.

Sembol	Açıklama
Y_t	Bir ya da ve birden fazla kere farkı alınmış zaman serisi
Z	Sabit
θ_p	AR model parametresi
ϑ_j	MA model parametresi
ε_t	Hata miktarı

$$Y_t = Z + \theta_1 Y_{t-1} + \theta_2 Y_{t-2} + \cdots + \theta_p Y_{t-p} + \vartheta_1 \varepsilon_{t-1} + \vartheta_2 \varepsilon_{t-2} + \cdots + \vartheta_j \varepsilon_{t-j} \quad (11)$$

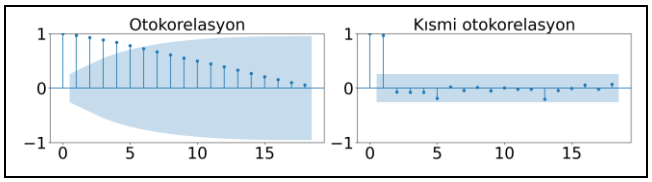
ARIMA çalışmasına ait sözde kod Rutin 3'te verilmiştir.

Rutin 3. SMS sayısının ARIMA ile tahmini için sözde kod.

Routine 3. Pseudocode for forecasting the SMS quantity using ARIMA.

```
Veri kümesini yükle.
Otokorelasyon ve kısmi otokorelasyon grafiklerinin çiz.
Durağanlık testi için Dickey Fuller testini uygula.
p <0.05 oluncaya kadar x değeri 1'den başlamak üzere x kere:
    x. dereceden fark alma işlemini yap.
    Dickey Fuller testini yap.
    Otokorelasyon ve kısmi otokorelasyon grafiklerini çiz.
Veriyi 0.75:0.25, 0.5:0.5, 0.25:0.75 oranlarında eğitim-test için ayır.
Oluşturulan üç veri kümesi için modeli çalıştır.
MSE ve MAPE değerlerini hesapla.
```

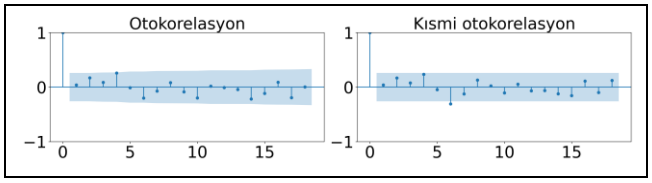
ARIMA modeliyle tahmin çalışmasında öncelikle otokorelasyon ve kısmi otokorelasyon grafikleri çizilmiştir. Şekil 3, ham veri için ilgili grafikleri göstermektedir.



Şekil 3. Ham veride otokorelasyon ve kısmi otokorelasyon.

Figure 3. Autocorrelation and partial autocorrelation in the raw data.

Grafik çizimlerinin ardından, durağanlık testi birim kök testlerinden birisi olan Dickey Fuller ile yapılmış ve gözlemlenen hata değeri olan p değeri 0.91 çıkmıştır. Birinci dereceden fark alma işlemi geçekleştirildikten sonra ise p değeri 0.006'ya inmiştir. Bu değer, çalışmada kabul edilebilir hata yüzdesi olarak kullanılan 0.05'in altında olduğundan fark alımıyla serinin durağan hale geldiği gözlemlenmiştir. Farkı alınan veriler için Şekil 4 incelendiğinde, otokorelasyon grafiğinde anlamlı bir korelasyonun olmadığı, kısmi otokorelasyon grafiğinde bir adet anlamlı korelasyonun olduğu görülmüştür. Bu sebeple model parametreleri (1,1,0) alınmıştır.



Şekil 4. Fark verisinde otokorelasyon ve kısmi otokorelasyon.

Figure 4. Autocorrelation and partial autocorrelation in the differenced data.

Tablo 9'da görülebileceği gibi 0.75:0.25 eğitim-test oranı en düşük MAPE ve MSE değerlerini vermiştir.

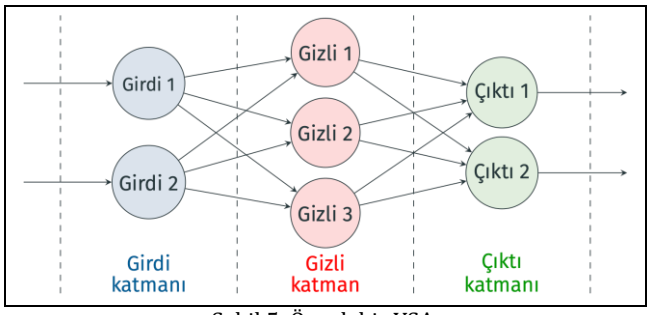
Tablo 9. ARIMA tahminlerinin farklı eğitim-test oranlarındaki performansı.

Table 9. ARIMA forecast performance under different training-to-test ratios.

Eğitim-test oranı	MAPE	MSE
0.75:0.25	0.576412	19,753,650
0.50:0.50	1.422308	195,232,491
0.25:0.75	2.399017	848,639,698

3.6.3 Yapay sinir ağları

YSA'nın temellerinin 1943'te McCullogh ve Pitts tarafından hücre modeli oluşturulmasıyla atıldığı kabul edilmektedir [44]. Beyin yapısından esinlenerek ortaya çıkan YSA, kendisine gelen bilgileri toplar, aktivasyon fonksiyonundan geçirerek ürettiği çıktıları diğer hücrelere iletir [45]. YSA, geçmiş tecrübelerden öğrenebilme özelliği sayesinde yeni bilgileri tahmin edebilme yeteneğine sahiptir [46]. Çeşitli katmanlar ile nöronlar ve aralarındaki bağlantılardan oluşan bir ağa (Şekil 5), önce bir girdi kümesi tanıtılır ve ardından ağın eğitilmesi sağlanır.



Şekil 5. Örnek bir YSA.

Figure 5. An example artificial neural network.

Eğitme işleminin ardından, tüm nöronların girdileri bir aktivasyon fonksiyonundan geçerek çıktıya dönüşür [47]. Aktivasyon fonksiyonuyla ilgili notasyon Tablo 10'da, formülasyonlar tek ve birden fazla girdili durumlar için sırasıyla Denklemler (12) ve (13)'te verilmiştir [48].

Tablo 10. Aktivasyon fonksiyonu için kullanılan notasyon.

Table 10. The notation used for the activation function.

Sembol	Açıklama
y_i	i. düğümün çıktısı,
x_j ve x_k	Düğümün j. ve k. girdileri, $j = 1,2,\ldots,n$
w_{ij}	i ve j düğümleri arasındaki ilişkinin ağırlığı (tek girdili durum)
w_{ijk}	i, j ve k düğümleri arasındaki ilişkinin ağırlığı (çok girdili durum)
θ_i	i. düğümün eşiği veya sapması
f_i	i. düğüm için aktivasyon fonksiyonu

$$y_i = f_i\left(\sum_{j=1}^{n} w_{ij} x_j - \theta_i\right) \quad (12)$$

$$y_i = f_i\left(\sum_{j=1}^{n} \sum_{k=1}^{n} w_{ijk} x_j x_k - \theta_i\right) \quad (13)$$

YSA ile tahmin sürecini etkin bir şekilde yürütebilmek için çalışma üç aşamada gerçekleştirilmiştir:

- İlk aşama, RFE yöntemiyle sıralanan özelliklerden en iyi performans gösterenlerini ve en iyi eğitim-test oranını,
- İkinci aşama, katman, nöron ve epok sayılarının tahmin performansına etkisinin gözlemlenerek en uygun ağ yapısını,

- Üçüncü aşama, çeşitli aktivasyon fonksiyonlarının zaman serisine etkisini

belirlemek amaçlarını gütmektedir. Rutin 4, YSA'yla tahmin çalışmasının sözde kodunu vermektedir.

Rutin 4. SMS sayısının YSA'yla tahmin çalışmasının sözde kodu.

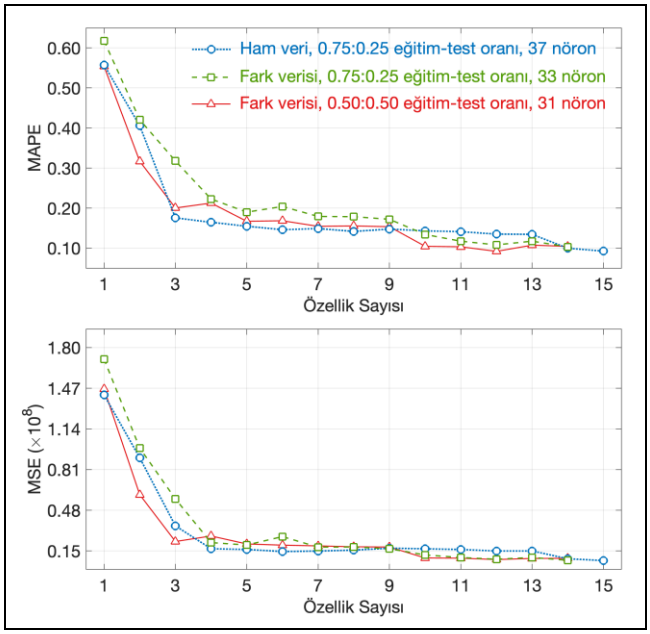
Routine 4. Pseudocode for forecasting the SMS quantity using artificial neural networks.

```
Birinci aşama:
    Ham ve birinci dereceden fark alınmış veriler için, RFE
    yöntemiyle özellik önem sıralaması yap.
    YSA'yla denemeler yaparak en iyi özellik sayısı ve eğitim-test
    oranını belirle.
İkinci aşama:
    Birinci aşamada belirlenen en iyi özellik sayısı ile eğitim-test
    oranı için:
        Gizli katman sayısı m ∈ [1, 5] için:
            Epok sayısını 200 ve 300 alarak:
                YSA'yla denemeler yap.
    En iyi sonucu veren katman ve epok sayılarını belirle.
Üçüncü aşama:
    ReLU, tanh ve doğrusal fonksiyonları kullanarak ikinci aşamada
    belirlenen katman ve epok sayıları için:
        YSA'yla denemeler yap.
    YSA denemelerindeki en iyi sonucu belirle.
```

Birinci aşamada, Bölüm 3.2'de bahsedilen üç değişik eğitim-test oranı için, RFE yöntemiyle sıralanmış özelliklerden hem ham hem de birinci dereceden fark alınmış veriler kullanılarak (Tablo 2) özellik seçimi yapılmıştır. Özellik seçiminde, olası tüm girdi sayıları için RFE'yle elenen özellik kolonları veri kümelerinden silinmiştir. Ardından, 1 girdi, 1 gizli ve 1 çıktı katmanlı bir YSA modeli oluşturularak 5-40 arasındaki nöron sayıları ve 200 epok kullanılarak tahminler yapılmıştır. YSA'nın ağırlıklarını güncellemede, literatürde sıklıkla karşılaşılan ve genellikle iyi sonuçlar üreten Adam algoritması kullanılmıştır [49]. Süre kısıtı da gözetilerek, her nöron sayısı için 10 deneme yapılmış ve bunların ortalama MSE ve MAPE değerleriyle hata metrikleri elde edilmiştir. İlk aşamanın sonuçları Tablo 11'de listelenmiş olup en iyi sonuçlar kalın olarak belirtilmiştir.

Ham veri için 0.75:0.25 eğitim-test oranındaki veri kümesinde 15; fark alınmış veri için 0.75:0.25 eğitim-test oranındaki veri kümesinde MAPE metriğine göre 12 (bk. Tablo 3'teki 8., 11. ve 12. özellikler elenmiştir), 0.50:0.50 eğitim-test oranındaki veri kümesinde MSE metriğine göre 14 (bk. Tablo 3'teki 12. özellik elenmiştir) özellik girdili modeller en iyi sonucu vermiştir. Bu veri tipleri, eğitim-test oranları ve özellik sayılarıyla ikinci aşamaya geçilmiştir.

Hedef değişkenle ilgili özelliklerin seçimi, eğitim-test oranının ve ilgili verilerin belirlenişi, YSA'nın tahmin performansını etkiler ([50],[51]). Bu çalışmada, eğitim verisi oranının %50 ve üstü olduğunda, özellik sayısı arttıkça hata metriklerinin değerlerinin genel olarak düştüğü gözlemlenmiştir. Örneğin, eğitim-test oranı ile nöron sayıları Tablo 11'deki en düşük hata metrik değerlerine karşılık gelen değerlerde sabit tutulup, özellik sayısı artırıldığında MAPE ve MSE değerlerinin azalma eğiliminde olduğu Şekil 6'da görülebilir.



Şekil 6. RFE yöntemiyle seçilen özellik sayısına göre hata metriklerinin değişimleri.

Figure 6. Changes in error metrics versus number of features selected with the RFE method.

İkinci aşamada, ağ yapısı (katman, nöron ve epok sayıları) kafes arama (grid search) kullanılarak belirlenmiştir. Literatürde, kullanılacak gizli katman, nöron ve epok sayılarına ilişkin çeşitli deneysel çalışmalar bulunmaktadır ([52]-[54]). Denemelerin uzun sürmesi sebebiyle gizli katman sayısı 1 ile 5, nöron sayısı 5 ile 40 arasında; epok sayısı ise 200 ve 300 olarak sınırlandırılmıştır [55]. Her YSA yapısı 10 kez çalıştırıldığından, birinci aşamadaki en iyi sonucu veren özellikler ve ilgili veri kümelerinin her biri için 3600 deneme yapılmıştır.

Her iki performans metriğine göre de en iyi sonuçlar fark alınmış verilerle RFE yönteminin sonucunda elde edilen 14 özellik girdili modellerle elde edilmiştir. Sonuçlar Tablo 12'de verilmiş olup en iyi sonuçlar kalın olarak gösterilmiştir. MAPE metriğine göre 3 gizli katmanlı, 38 nöronlu ve 300 epoklu; MSE metriğine göre 5 gizli katmanlı, 40 nöronlu ve 300 epoklu ağlar en iyi performansları göstermiştir.

Tablo 11. Özellik ve eğitim-test oranı seçimiyle ilgili en iyi ilk aşama sonuçları.

Table 11. Best first-phase results for the feature and training-to-test ratio selection.

Veri Tipi	Eğitim-test oranı	Özellik sayısı	Nöron sayısı	MAPE	MSE
Ham	0.25:0.75	15	24	0.148543	10,621,600
	0.25:0.75	15	36	0.135298	11,254,240
	0.50:0.50	15	38	0.098026	7,588,416
	0.75:0.25	**15**	**37**	**0.092622**	**7,197,161**
Fark alınmış	0.25:0.75	11	37	0.137982	8,861,345
	0.25:0.75	12	34	0.127532	9,234,935
	0.50:0.50	**14**	**31**	0.103357	**7,398,551**
	0.50:0.50	14	39	0.099509	8,339,657
	0.75:0.25	**12**	**33**	**0.092115**	8,011,594
	0.75:0.25	14	38	0.099607	7,776,198

Tablo 12. Ağ yapısıyla ilgili en iyi ikinci aşama sonuçları.

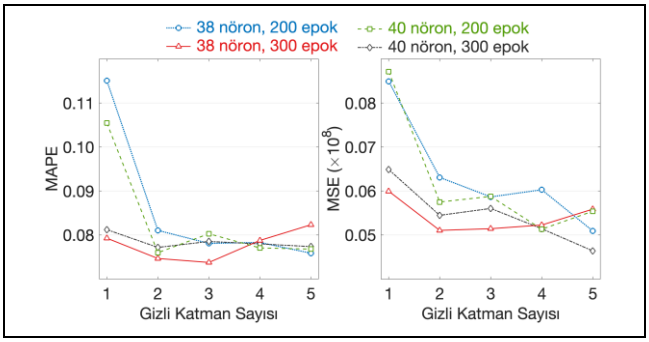
Table 12. Best second-phase results for the network structure.

Veri tipi, eğitim-test oranı, özellik sayısı	Gizli katman sayısı	Nöron sayısı	Epok sayısı	MAPE	MSE
Ham, 0.75:0.25, 15	1	20	300	0.098135	8,255,654
	1	30	300	0.099747	7,139,096
	2	34	200	0.092215	6,876,626
	2	40	200	0.092735	6,680,840
	2	26	300	0.091175	6,072,133
	3	24	200	0.091578	6,231,353
	3	37	300	0.096836	6,466,148
	4	31	200	0.094882	6,513,967
	4	20	300	0.098618	6,773,953
	4	32	300	0.100089	6,306,123
	5	35	200	0.093087	6,110,056
	5	10	300	0.101317	6,886,820
	5	20	300	0.102933	6,780,095
Fark alınmış, 0.75:0.25, 12	1	33	300	0.092442	7,158,851
	1	40	300	0.096423	7,006,669
	2	39	200	0.090776	6,428,311
	2	34	300	0.093745	6,437,627
	2	27	300	0.094462	6,425,916
	3	19	200	0.092321	6,817,775
	3	35	200	0.093674	6,025,971
	3	13	300	0.095408	6,723,493
	3	22	300	0.096771	6,491,928
	4	14	200	0.095380	7,036,219
	4	27	200	0.096205	6,294,917
	4	13	300	0.096092	6,611,422
	4	21	300	0.096793	6,207,855
	5	18	200	0.092925	6,722,284
	5	35	200	0.098586	6,265,286
	5	33	300	0.096703	6,483,223
Fark alınmış, 0.50:0.50, 14	1	38	300	0.079273	5,995,044
	2	40	200	0.075973	5,749,600
	2	36	200	0.081801	5,668,842
	2	38	300	0.074658	5,104,798
	3	34	200	0.076830	5,372,284
	3	**38**	**300**	**0.073757**	5,143,250
	4	33	200	0.075086	5,630,001
	4	40	200	0.077054	5,131,178
	4	36	300	0.074951	4,786,122
	5	29	200	0.075691	5,510,914
	5	38	200	0.075866	5,092,965
	5	24	300	0.075326	5,137,498
	5	**40**	**300**	0.077363	**4,638,883**

Deneyler sonucunda, tüm modeller için geçerli olmasa da katman, nöron ve epok sayılarındaki artışın performansı genel olarak artırdığı görülmüştür (Şekil 7). Ek Tablo B.1'de örnek olarak 3 ve 5 gizli katmanlı YSA'da ele alınan tüm nöron ve epok sayılarına ait MAPE değerleri verilmiştir.

Üçüncü aşamada, çıktı katmanındaki aktivasyon fonksiyonunun model performansına etkisi sigmoid yerine ReLU, tanh ve doğrusal kullanılarak incelenmiştir. Denemelerde, ikinci aşamanın her iki metrik için en iyi sonuçları veren modelleri kullanılmıştır (Tablo 12). Tablo 13'te bu aşamanın sonuçları özetlenerek en iyileri kalın olarak gösterilmiştir.

Hata metriklerinin en düşük değerleri doğrusal aktivasyon fonksiyonuyla elde edilmiştir. Ancak, sigmoid fonksiyonunun performansı da bu değerlere oldukça yakındır. Verinin genelinde azalan bir trend olsa da, bazı periyotlarda artan değerlerin bulunması sebebiyle (Şekil 1) ReLU aktivasyon fonksiyonunun nöronları aktive etmekte başarılı olamaması beklenen bir durumdur [56].



Şekil 7. Gizli katman ve epok sayılarının tahmin performansına etkileri (14 özellik, fark verisi, 0.50-0.50 eğitim-test oranı).

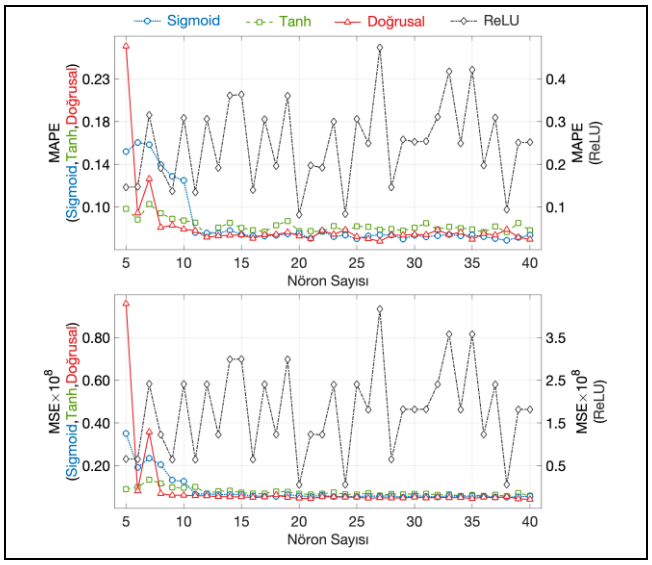
Figure 7. Effects of hidden layer and epoch quantity on the forecasting performance (14 features, differenced data, 0.50-0.50 training-to-test ratio).

Tablo 13. Aktivasyon fonksiyonlarının tahmin performansına etkileri.

Table 13. Effects of activation functions on the forecasting performance.

Aktivasyon fonksiyonu	Gizli katman sayısı	Nöron sayısı	MAPE	MSE
ReLU	3	20	0.081685	4,971,176
ReLU	5	15	0.135647	63,774,733
Tanh	3	12	0.077469	6,858,741
Tanh	3	38	0.081454	5,714,426
Tanh	5	33	0.077708	5,885,620
Tanh	5	39	0.080609	5,298,009
Doğrusal	**3**	**27**	**0.072853**	4,888,124
Doğrusal	**3**	**40**	0.074697	**4,196,943**
Doğrusal	5	27	0.076807	5,006,053
Doğrusal	5	39	0.080796	4,490,899

Şekil 8'de MAPE ve Şekil 9'da MSE metriklerinin nöron sayısına ve kullanılan aktivasyon fonksiyonuna göre değişimleri görülebilir. Nöron sayısı arttıkça azalan bir performans artışı (örneğin Şekil 8'de yaklaşık 12 nörondan sonra) beklenen bir durumdur. Pratikte, modelin karmaşıklığını ve çalışma süresini düşürmek için metriklerde iyileşmenin azalmaya başladığı nöron sayısı kullanılabilir.

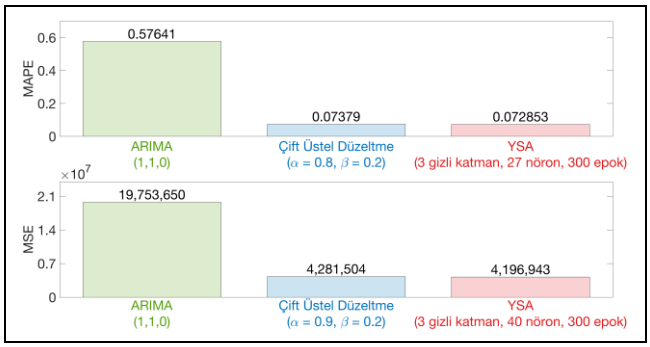


Şekil 8. Nöron sayısı ve aktivasyon fonksiyonlarının tahmin performansına etkileri (14 özellik, fark verisi, 0.50-0.50 eğitim-test oranı, 3 gizli katman).

Figure 8. Effects of neuron quantity and activation function on the forecasting performance (14 features, differenced data, 0.50-0.50 training-to-test ratio, 3 hidden layers).

4 Tahmin modellerinin karşılaştırılması

Bu bölümde, çift üstel düzeltme, ARIMA ve YSA modellerinin en iyi performans gösterdiği parametreler ve yapılar kullanılarak tahmin performansları karşılaştırılmıştır. İlgili MAPE ve MSE metriklerinin değerleri en yüksekten en düşüğe sıralanmış olarak Şekil 9'daki sütun grafiğinde verilmiştir. Buna göre, eğitim-test oranı 0.50:0.50, 14 özellik girdili ve 3 gizli katmanlı YSA modeli diğer modellere göre en düşük MAPE ve MSE değerlerini vermiştir. Spesifik olarak, çıktı katmanında doğrusal aktivasyon fonksiyonu kullanıldığında, MAPE metriği için 27 nöronlu ve 300 epoklu; MSE metriği için 40 nöronlu ve 300 epoklu modeller en iyi performansları göstermiştir.



Şekil 9. Tahmin modellerinin hata metriklerinin karşılaştırması.

Figure 9. Comparison of the performance measures of the forecasting models.

Şekil 9'da ARIMA ile diğer modeller arasındaki fark görsel olarak belirgin olsa da, çift üstel düzeltmeyle YSA modelleri arasındaki fark oldukça küçüktür. Farkların istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını belirlemek için ek analizler yapılabilir. Bu çalışmada, parametrik olmayan, ikiden fazla popülasyonu karşılaştırmaya olanak tanıyan ve farklı örneklem büyüklükleri için kullanılabilen Kruskal-Wallis testi kullanılmıştır.

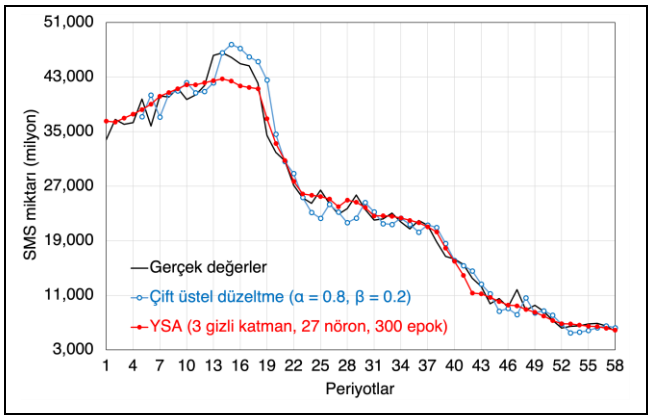
Üçlü karşılaştırmayla Kruskal-Wallis testine başlanmış ve p değeri 0.05'ten küçük olduğundan en az iki yöntemin hata değerleri arasında anlamlı fark olduğu saptanmıştır. Bu nedenle, ikili karşılaştırmalara geçilmiştir (Tablo 14). İkili karşılaştırmalarda ARIMA modeli diğer modellerden belirgin olarak farklı çıkmıştır. Çift üstel düzeltmeyle YSA arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğuna dair yeterli kanıt bulunamamıştır. Dolayısıyla, eldeki verilerle SMS miktarının tahmininde ARIMA'nın tercih edilmemesi için yeterli kanıt varken, çift üstel düzeltme modeli ve YSA kullanımında esneklik bulunduğunu söyleyebiliriz. Örneğin, çift üstel düzeltme, YSA'ya göre daha basit ve yorumlanabilir bir model olduğundan tercih edilebilir.

Tablo 14. Kruskal-Wallis testinin sonuçları.

Table 14. Kruskal-Wallis test results.

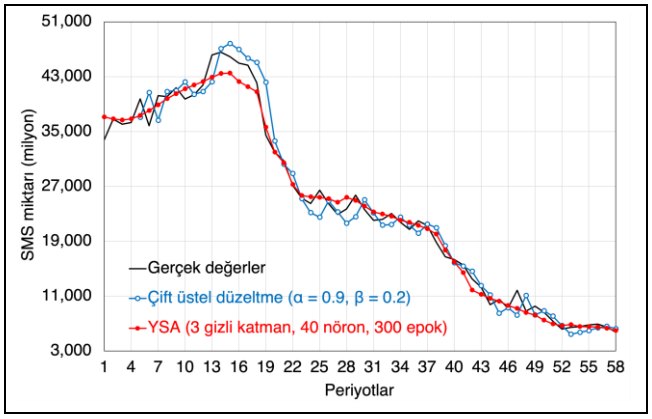
Performans metriği	Karşılaştırılan modeller	Test istatistiği	p değeri
MAPE	ARIMA-DES-YSA	19.7654	0.0001
	ARIMA-DES	18.1691	0.0000
	ARIMA-YSA	14.2567	0.0002
	DES-YSA	0.5693	0.4505
MSE	ARIMA-DES-YSA	20.0378	0.0000
	ARIMA-DES	17.7989	0.0000
	ARIMA-YSA	15.4006	0.0001
	DES-YSA	0.6591	0.4169

Şekiller 10 ve 11, gerçek verilerle en iyi performans gösteren çift üstel düzeltme ve YSA modellerinin tahmin değerlerini göstermektedir. Verideki değişimin daha düzenli olduğu periyotlarda değerlerin birbirine oldukça yakın olduğu, ancak dalgalanmaların arttığı periyotlarda birbirlerinden farklılaştığı görülebilir. Bu sonuçlar beklenen bulgulardır. Eldeki veri miktarının yeterli olmaması özellikle YSA'nın eğitimini ve dolayısıyla model parametrelerinin optimizasyonunu etkilediğinden tahmin hatalarına sebep olabilmektedir. Çift üstel düzeltme yönteminin ise veride dalgalanmaların olduğu periyotlardaki tahminlerde gecikmelere yol açması beklenen bir sonuçtur.



Şekil 10. MAPE metriğinde en iyi performans gösteren modellerin tahmin değerleri ve gerçek SMS miktarları.

Figure 10. Forecasts of the models with the best performance in MAPE versus actual SMS quantities.



Şekil 11. MSE metriğinde en iyi performans gösteren modellerin tahmin değerleri ve gerçek SMS miktarları.

Figure 11. Forecasts of the models with the best performance in MSE versus actual SMS quantities.

5 Sonuçlar

Bu çalışmada, Türkiye'de gönderilen SMS miktarının tahmini için çift üstel düzeltme, ARIMA ve YSA modelleri oluşturularak modellerin tahmin performansları MSE ve MAPE metrikleriyle karşılaştırılmıştır. Bu metriklere göre modellerin en iyi parametre değerleri kafes arama yöntemiyle belirlenmiş, ardından tahmin performansları karşılaştırılarak en yüksek performansa sahip model (YSA) seçilmiştir. YSA ve çift üstel düzeltme modellerinin tahmin ve hata metrik değerlerinin birbirine yakın olduğu gözlemlendiğinden, modellerin performansları arasında anlamlı bir istatistiksel fark olup olmadığı Kruskal-Wallis testi kullanılarak belirlenmiştir. Buna göre ARIMA modeli diğerlerinden belirgin olarak farklıdır. Çift üstel düzeltme ve YSA modellerinin performansları arasında ise anlamlı bir fark olduğuna dair yeterli bulgu elde edilememiştir. Bu sonuçlar, pratikte SMS miktarının tahmininde çift üstel düzeltme ve YSA modelleri arasında seçim esnekliği sağlayabilir. Çift üstel düzeltme, kısa vadeli tahminler için pratik, hızlı ve kolay yorumlanabilirken; YSA, hedef ve bağımsız değişkenler arasında karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri modellemede başarılı olmasına rağmen daha fazla veri ve hesaplama gücü gerektirir.

YSA özelinde bir diğer çalışma bulgusu; katman, nöron ve epok sayıları arttıkça tahmin performansının genel olarak iyileştiği yönündedir. Ayrıca, YSA modelinin çıktı katmanında ReLU, tanh ve sigmoid aktivasyon fonksiyonları yerine doğrusal fonksiyonu kullanıldığında daha iyi tahmin değerleri ürettiği gözlemlenmiştir.

Yapılan bu çalışmanın sınırlılıkları olarak; girdilere ait veri sayılarının az olması, bazı girdilerin çeyrek dönem yerine yıllık olarak yayımlanması ve deneylerin çok zaman alması gösterilebilir. Veri eksikliği ve yayımlanan verilerin büyük ölçüde yıllık olmasından kaynaklanan zorlukları aşmak için, anlık SMS kullanım verilerini analiz ederek tahminleri dinamik olarak güncelleyebilen ve hızlı karar mekanizmaları oluşturabilen yöntemler gelecekteki çalışmalar kapsamında ele alınabilir. Bu tür yöntemler örneğin RCS gibi gelişen diğer mesajlaşma teknolojilerinin kullanıcı sayısı ve mesaj sayısının tahmini için daha uygun olabilir. Ayrıca, zaman serilerinin tahminine uygun olabilecek LSTM gibi derin öğrenme tekniklerinin veya klasik istatistiksel yöntemlerle derin öğrenme algoritmalarının güçlü yönlerini birleştirerek tahmin doğruluğunu artırabilecek hibrit yöntemler uygulanabilir.

Kullanılan yöntemlerin, Türkiye'deki mobil ve genişbant abone sayıları, mobil veri trafiği gibi değişkenler için tahmin performansları incelenebilir. Telekom sektörü dışında farklı sektörlerdeki işletmeler mobil hizmet talep tahminlerini kullanarak, satış, kampanya, etkinlik gibi faaliyetlerini planlayabilir ve servis sağlayıcılarla yapacakları anlaşmalarda stratejik kararlar alabilir.

Son olarak, tahmin yöntemlerinin telekom sektöründeki iş zekası sistemlerine entegrasyonu kapsamında, bulut destekli sistemlerin incelenmesi ve uygulanması (bk. [57]) ile karar destek sistemlerinin geliştirilmesinin (bk. [58]) de değerli katkılar sunacağı düşünülmektedir.

6 Conclusions

In this study, double exponential smoothing, ARIMA, and artificial neural network (ANN) models are developed for forecasting the SMS quantity sent in Türkiye, and the forecasting performances of these models are compared using MAPE and MSE measures. These measures are used as the criteria for the grid search conducted to determine the best model parameter values, and then, to compare and select the best performing model (ANN). Since the forecasts and error metrics of the ANN and double exponential smoothing models are observed to be close to each other, Kruskal-Wallis test is used to check for any statistically significant difference between the model performances. Accordingly, the ARIMA model differs significantly from the others. However, no sufficient evidence was found to indicate a significant difference between the performances of the double exponential smoothing and ANN models. In practice, these results provide flexibility in choosing between the double exponential smoothing and ANN models in forecasting the SMS quantity. While double exponential smoothing is practical, fast, and easy to interpret for short-term forecasts, ANN, despite its ability to model complex and nonlinear relationships between target and independent variables, requires more data and computational power.

In the context of ANN, another finding is that the forecasting performance generally improves as the quantities of layers, neurons, and epochs increase. Additionally, it was observed that the ANN with the linear activation function in the output

layer produces better forecasts than those with ReLU, tanh, and sigmoid activation functions.

Limitations of this study include the small number of data points for the inputs, the fact that some inputs are published annually rather than quarterly, and the time-consuming nature of the experiments. To overcome the challenges posed by the scarcity of and missing data, future studies may explore methods that enable real-time analysis of SMS usage data, allowing for dynamic updates to forecasts and the development of rapid decision-making mechanisms. These methods can better suit for forecasting user counts and message quantities in the case of other developing messaging technologies such as RCS. Additionally, deep learning techniques such as LSTM, which may be suitable for time series forecasting, or hybrid methods that combine the strengths of classical statistical methods and deep learning algorithms to enhance forecasting accuracy, can be implemented. Forecasting performances of the methods can be analyzed for response variables such as number of mobile and broadband subscribers and mobile data traffic in Türkiye. Businesses in sectors other than telecommunications can use mobile service demand forecasts to plan their activities such as sales, campaigns, events, and to make strategic decisions in their agreements with service providers. Finally, we believe it is worthwhile examining and implementing cloud-supported systems (see, e.g., [57]) and developing decision support systems (see, e.g., [58]) for integrating forecasting methods into business intelligence systems.

7 Yazar katkı beyanı

Mehtap Parlak fikrin oluşması, literatür taraması, deneylerin yapılması, sonuçların değerlendirilmesi; Gonca Yıldırım fikrin şekillenmesi, kullanılacak yöntemlerle ve deneylerle ilgili yol gösterilmesi, çalışmanın sürekli kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuştur.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

9 Kaynaklar

[1] Yapraklı TŞ, Altay Ş. "Mobil anlik mesajlaşma servislerinin kullanimi üzerinde etkili faktörlerin incelenmesi: ardahan üniversitesi öğrencileri üzerinde bir saha araştırması". *Öneri Dergisi*, 12(48), 199-216, 2017.

[2] GSMA. (t.y.). "Rich Communication Services (RCS)". https://www.gsma.com/solutions-and-impact/technologies/networks/rcs/ (01.04.2025).

[3] Demir L, Akkaş S. "A comparison of sales forecasting methods for a feed company: A case study". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(4), 705-712, 2018.

[4] Özden C, Açı Ç. "Makine öğrenmesi yöntemleri ile yaralanmalı trafik kazalarının analizi: Adana örneği". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(2), 266-275, 2018.

[5] Erdem F. "Parameter estimation in crystal sugar production with MLR, ANN and ANFIS". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(7), 987-992, 2022.

[6] Aydemir E, Karaatlı M, Yılmaz G, Aksoy S. "112 Acil çağrı merkezine gelen çağrı sayılarını belirleyebilmek için bir yapay sinir ağları tahminleme modeli geliştirilmesi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(5), 145-149, 2014.

[7] Zeybel Peköz A, İnkaya T. "Derin öğrenme ile talep tahmini: Bir üçüncü parti lojistik firması için COVID-19 döneminde vaka analizi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29(4), 331-339, 2023.

[8] Nikravesh AY, Ajila SA, Lung CH, Ding W. "Mobile network traffic prediction using MLP, MLPWD, and SVM". *2016 IEEE International Congress on Big Data*, SF, USA, 27 Jule-02 July 2016.

[9] Siluyele I, Jere S. "Using Box-Jenkins models to forecast mobile cellular subscription". *Open Journal of Statistics,* 6(2), 81-90, 2016.

[10] Huang CW, Chiang CT, Li Q. "A study of deep learning networks on mobile traffic forecasting". *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications,* Montreal, Canada, 8-13 October 2017.

[11] Alvarado JG, Alvarado AD, Lema, EV. "Time series analysis of telecommunications data using neural networks". *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, 12(14), 2835- 284, 2021.

[12] Prajam S, Wechtaisong C, Khan AA. "Applying machine learning approaches for network traffic forecasting". *Indian Journal of Computer Science and Engineering,* 13(2), 324-335, 2022.

[13] Xie R, Guan X, Cao J, Wang X, Wu H. "HSeq2Seq: Hierarchical graph neural network for accurate mobile traffic forecasting". *Information Sciences,* 679, 1-18, 2024.

[14] Batool I, Fouda MM, Fadlullah ZM. "Deep learning-based throughput prediction in 5G cellular networks". *2024 International Conference on Smart Applications, Communications and Networking*, Harrisonburg, USA, 28-30 May 2024.

[15] Zeng L, Zhang C, Qin P, Zhou Y, Cai Y. "One method for predicting satellite communication terminal service demands based on artificial ıntelligence algorithms". *Applied Sciences*, 14, 6019, 2024.

[16] Jiang W, Zhang Y, Han H, Huang Z, Li Q, Mu J. "Mobile traffic prediction in consumer applications: A multimodal deep learning approach". *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 70(1), 3425-3435, 2024.

[17] Türkiye İstatistik Kurumu. "Tüketici Fiyat Endeksi, Aralık 2023". https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Tuketici-Fiyat-Endeksi-Aralik-2023-49657 (20.09.2024).

[18] Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu. "Pazar Verileri". https://www.btk.gov.tr/pazar-verileri (29.08.2024).

[19] Türkiye İstatistik Kurumu. "Ulusal Eğitim İstatistikleri, 2023". https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Ulusal-Egitim-Istatistikleri-2023-53444 (20.09.2024).

[20] Can U. "Eksik veri probleminin çözümü". *YBS Ansiklopedi*, 12(1), 24-60, 2024.

[21] Huang G. "Missing data filling method based on linear interpolation and LightGBM". *Journal of Physics: Conference Series*, 1754(1), 1-6, 2021.

[22] Iranzad R, Liu X. "A review of random forest-based feature selection methods for data science education and applications". *International Journal of Data Science and Analytics*, 20(2), 197-211, 2024.

[23] Aksu G, Güzeller CO, Eser MT. "The effect of the normalization method used in different sample sizes on the success of artificial neural network model". *International Journal of Assessment Tools in Education*, 6(2), 170-192, 2019.

[24] Singh D, Singh B. "Feature wise normalization: An effective way of normalizing data". *Pattern Recognition*, 122, 108307, 2022.

[25] Shalabi L, Shaaban Z. "Normalization as a preprocessing engine for data mining and the approach of preference matrix". *2006 International Conference on Dependability of Computer Systems*, Szklarska Poreba, Poland, 25-27 May 2006.

[26] Eesa AS, Arabo W. "A normalization method for backpropagation: A comparative study". *Science Journal of University of Zakho*, 5(4), 319, 2017.

[27] Hyndman RJ, Koehler AB. "Another look at measures of forecast accuracy". *International Journal of Forecasting*, 22(4), 679–688, 2006.

[28] Saigal S, Mehrotra D. "Performance Comparison of Time Series Data Using Predictive Data Mining Techniques". *Advances in Information Mining*, 4(1), 57-66, 2012.

[29] Armstrong JS, Collopy F. "Error measures for generalizing about forecasting methods: Empirical comparisons". *International Journal of Forecasting*, 8(1), 69-80, 1992.

[30] Zhang G, Patuwo BE, Hu MY. "Forecasting with artificial neural networks: The state of the art". *International Journal of Forecasting*, 14(1), 35-62, 1998.

[31] Öztürk K, Şahin ME. "Yapay sinir ağları ve yapay zekâ'ya genel bir bakış". *Takvim-i Vekayi*, 6(2), 25-36, 2018.

[32] Banerjee C, Mukherjee T, Pasiliao EJ. "An empirical study on generalizations of the ReLU activation function". *Proceedings of the ACM Southeast Conference,* Kennesaw, GA, USA, 18-20 April 2019.

[33] TensorFlow. "tf.keras.activations.sigmoid". https://www.tensorflow.org/api_docs/python/tf/keras/activations/sigmoid (19.12.2024).

[34] Chen Y, Li L, Li W, Guo Q, Du Z, Xu Z. *Fundamentals of Neural Networks.* Editör: Merken S. AI computing systems: An Application-Driven Perspective, 17-51, Cambridge, USA, Morgan Kaufmann, 2022.

[35] Bhujade RK, Asthana S. "An extensive review of ReLU and sigmoid function in multiple hidden layer back propagation neural network model". *International Journal of Applied Engineering and Technology*, 5(2), 67-70, 2023.

[36] Rasamoelina AD, Adjailia F, Sinčák P. "A review of activation function for artificial neural network". *IEEE 18th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics*, Herlany, Slovakia, 23-25 January 2020.

[37] Sharma S, Sharma S, Athaiya A. "Activation functions in neural networks". *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 4(12), 310-316, 2020.

[38] Kruskal WH, Wallis WA. "Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis". *Journal of the American Statistical Association*, 47(260), 583-621, 1952.

[39] Goodwin P. "The Holt–Winters approach to exponential smoothing: 50 years old and going strong". *Foresight: The International Journal of Applied Forecasting*, 19, 30-33, 2010.

[40] Bergmeir C, Hyndman RJ, Beníte JM. "Bagging exponential smoothing methods using STL decomposition and Box–Cox transformation". *International Journal of Forecasting*, 32(2), 303-312, 2016.

[41] Billah B, King ML, Snyder RD, Koehler AB. "Exponential smoothing model selection for forecasting". *International Journal of Forecastin*g, 22(2), 239-247, 2006.

[42] Nahmias S, Olsen TL. *Production and Operations Analysis.* 7th ed. Long Grove, Illinois, USA, Waveland Press, 2015.

[43] Peter D, Silvia P. "ARIMA vs. ARIMAX-Which approach is better to analyze and forecast macroeconomic time series". *Proceedings of 30th International Conference Mathematical Methods in Economics*, Karviná, Czech Republic, 11-13 September 2012.

[44] Mcculloch WS, Pitts WH. "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity". *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5, 115-133, 1943.

[45] Öztemel E. *Yapay Sinir Ağları*. 3. Baskı. İstanbul, Türkiye, Papatya Yayıncılık Eğitim, 2012.

[46] Uğur A, Kınacı AC. "Yapay zekâ teknikleri ve yapay sinir ağları kullanılarak web sayfalarının sınıflandırılması". *"Türkiye'de İnternet" Konferansı*, Ankara, Türkiye, 21-23 Aralık 2006.

[47] Arslan B, Ertuğrul İ. "Çoklu regresyon, ARIMA ve yapay sinir ağı yöntemleri ile Türkiye elektrik piyasasında fiyat tahmin ve analizi". *Yönetim ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 20(1), 331-353, 2022.

[48] Yao X. "Evolving artificial neural networks". *Proceedings of the IEEE*, 87(9), 1423–1447, 1999.

[49] Kingma DP, Ba J. "Adam: A Method for Stochastic Optimization". *arXiv*, 2014. https://arxiv.org/pdf/1412.6980.pdf.

[50] Pabuccu H, Barbu A. "Feature selection with annealing for forecasting financial time series". *Financial Innovation*, 10, 87, 2024.

[51] Joseph VR. "Optimal ratio for data splitting". *Statistical Analysis & Data Mining*, 15, 531-538, 2022.

[52] Ünal T, Çiftçi Ü, Urgan NN. "Bir gizli katmanlı yapay sinir ağlarında optimal nöron sayısının incelenmesi." *Süleyman Demirel University Faculty of Arts and Science Journal of Science*, 17(2), 303-325, 2022.

[53] Yılmazel Ö, Afşar A, Yılmazel S. "Konut fiyat tahmininde yapay sinir ağları yönteminin kullanılması". *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, 20, 285-300, 2018.

[54] Kurt R, Karayılmazlar S, İmren E, Çabuk Y. "Yapay sinir ağları ile öngörü modellemesi: Türkiye kâğıt-karton sanayi örneği". *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 19(2), 99-106, 2017.

[55] Çılgın C, Ünal C, Alıcı S, Akkol E, Gökşen Y. "Metin sınıflandırmada yapay sinir ağları ile Bitcoin fiyatları ve sosyal medyadaki beklentilerin analizi". *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 4(1), 106-126, 2020.

[56] Dubey SR, Singh SK, Chaudhuri BB. "Activation functions in deep learning: A comprehensive survey and benchmark". *Neurocomputing,* 503, 92-108, 2022.

[57] Torkul O, Kor E, Şişci M. "Tedarik zincirinde hibrit talep tahmin modeli önerisi: çelik sektörü uygulaması". *Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications*, 7(2), 66-80, 2024.

[58] Algorabi Ö, Namlı E. "Banka telepazarlama başarısının tahmini için bir birleşik makine öğrenme tabanlı karar destek modeli". *Verimlilik Dergisi* (1), 94-109, 2022.

Ek A

Kullanılan Kısaltmalar

Tablo A.1 Kısaltmalar.

Table A.1 Abbreviations.

Yöntemler/Hata Metrikleri	Tanımlamalar
3D CNN	Üç boyutlu evrişimli sinir ağı
ARIMA	Birleştirilmiş otoregresif hareketli ortalama
ASTGCN	Dikkat tabanlı uzamsal-zamansal grafik evrişim ağı
BiLSTM	Çift yönlü uzun kısa vadeli bellek
CNN	Evrişimli sinir ağı
Conv3D	3D konvolüsyonel sinir ağı
ConvGRU	Konvolüsyonel kapı yinelemeli birimler
ConvLSTM	Çok modlu evrişimsel uzun-kısa süreli bellek
DES	Çift üstel düzeltme
DMFS-MF	Çift modüler özellik paylaşım katmanı-çoklu görev öğrenme katmanı
FNN	İleri beslemeli yapay sinir ağı
GASTN	Uzamsal-zamansal grafik dikkat ağı
GNN	Grafik sinir ağı
Graph WaveNet	Grafik WaveNet
HA	Tarihsel ortalama
HGCN	Hiyerarşik grafik sinir ağı
HSeq2Seq	Hiyerarşik sıradan sıraya
LM	Levenberg-Marquardt algoritması
LSTM	Uzun kısa süreli bellek
MLP	Çok katmanlı algılayıcı
MLPWD	Ağırlık azalmalı çok katmanlı algılayıcı
MTL	Çoklu görev öğrenme
RF	Rastgele orman
RNN	Yinelemeli sinir ağı
Seq2Seq	Sıradan sıraya
SMA	Basit hareketli ortalama
STAGCN	Uzamsal-zamansal toplama grafiği evrişimsel ağ
STCnet	Uzamsal-zamansal çapraz alanlı sinir ağı
STDenseNet	Standartlaştırılmış yoğun bağlantılı evrişimli ağ
STGCN	Uzamsal-zamansal grafik evrişimsel ağ
STL	Tekli görev öğrenme
SVM	Destek vektör makinesi
SVR	Destek vektör resgresyonu
YSA	Yapay sinir ağı
AIC	Akaike bilgi kriteri
MAD	Ortalama mutlak hata sapması
MAE	Ortalama mutlak hata
MAPE	Ortalama mutlak yüzde hata
MSE	Ortalama kare hata
RE	Göreceli hata
RMSE	Ortalama kare hatanın karekökü
SBC	Schwarz Bayes kriteri

Ek B

3 ve 5 gizli katmanlı YSA denemelerinin performansları

Tablo B.1 3 ve 5 gizli katmanlı YSA modellerinde MAPE değerleri.

Table B.1 MAPE values for the ANN models with 3 and 5 hidden layers.

	(Gizli katman, Epok sayısı)			
Nöron sayısı	(3, 200)	(3, 300)	(5, 200)	(5, 300)
5	0.263592	0.156849	0.349084	0.182967
6	0.171565	0.165420	0.329471	0.145199
7	0.197723	0.163454	0.146056	0.091244
8	0.173863	0.144594	0.161699	0.110275
9	0.144244	0.133692	0.104790	0.094905
10	0.125975	0.129991	0.154662	0.080133
11	0.103580	0.080895	0.124133	0.083189
12	0.102059	0.080544	0.093280	0.082327
13	0.093224	0.080477	0.086876	0.077853
14	0.096466	0.083017	0.085102	0.078667
15	0.088318	0.079218	0.079982	0.078786
16	0.081816	0.077835	0.081081	0.080619
17	0.092447	0.077681	0.086517	0.079373
18	0.105664	0.078342	0.083331	0.078246
19	0.090914	0.079660	0.079656	0.080624
20	0.090690	0.080247	0.081218	0.078579
21	0.085996	0.075474	0.079440	0.079766
22	0.082993	0.082356	0.078073	0.080751
23	0.080467	0.077193	0.076510	0.077277
24	0.081624	0.078617	0.081956	0.075326
25	0.084416	0.075175	0.077859	0.079612
26	0.081956	0.077908	0.079692	0.076717
27	0.080636	0.078797	0.076795	0.080180
28	0.079196	0.078683	0.078719	0.078941
29	0.080491	0.074880	0.075691	0.076843
30	0.080773	0.078396	0.078034	0.084266
31	0.078937	0.077013	0.078210	0.079427
32	0.080122	0.078061	0.078976	0.077236
33	0.080049	0.079066	0.080408	0.077987
34	0.076830	0.077898	0.076622	0.076429
35	0.078420	0.078706	0.077750	0.078280
36	0.079085	0.077173	0.076673	0.082186
37	0.078968	0.075311	0.077898	0.078001
38	0.078092	0.073757	0.075866	0.082320
39	0.077733	0.076437	0.080902	0.081121
40	0.080287	0.078531	0.076799	0.077363

Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 31(7), 1225-1234, 2025

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Tek anahtarlı kısmi rezonanslı inverterde güvenli çalışma bölgesi

Safe operating area in single switch quasi resonant inverter

Metin Öztürk[1*]

[1]Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İstanbul Esenyurt Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
metinytu@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 25.02.2024 Düzeltme Tarihi/Revision: 14.03.2025 doi: 10.5505/pajes.2025.05673
Kabul Tarihi/Accepted: 13.05.2025 Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Endüksiyon ile ısıtma (EI) teknolojisi, özellikle son yıllarda, yüksek verimlilik, hız, güvenli çalışma ve benzeri özellikleri nedeniyle ev tipi uygulamalarda geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. EI sistemlerinde genellikle yüksek verimlilikleri ve yumuşak anahtarlama yetenekleri nedeniyle rezonanslı inverter devreleri kullanılmaktadır. EI sistemlerinde kullanılan çeşitli rezonanslı inverterler arasında, tek anahtarlı kısmi rezonanslı (SSQR) inverter topolojisi düşük maliyetli ve düşük güç gerektiren uygulamalar için tercih edilmektedir. Ancak, SSQR inverter, maliyet avantajına rağmen, yumuşak anahtarlama ile çalışabildiği güç aralığının dar oluşu, güç kontrolünün zorluğu ve yarı iletken anahtarlarda oluşan akım ve gerilim zorlanmalarının diğer inverter uygulamalarına kıyasla yüksek olması gibi dezavantajları barındırır. Güç elektroniği devrelerindeki güvenli çalışma koşullarını zorlayan en önemli unsurlar, yarı iletken anahtarların maruz kalacağı yüksek gerilim ve yüksek akımlardır. Bununla birlikte elektronik devrelerin tüm bileşenleri aşırı akım ve aşırı gerilim stresinden etkilense de, invertör uygulamalarında en savunmasız elemanlar yarı iletken anahtarlardır. Aşırı akımın ürettiği aşırı ısı, zorlamalı soğutma yöntemleriyle azaltılabilse bile, yüksek gerilimlere maruz kalan yarı iletken anahtarlar, muhtemelen kısa devre olacak ve devre çalışamaz hale gelecektir. Bu çalışmada EI'da kullanılan SSQR inverter için yarı iletken anahtarların maruz kaldığı aşırı gerilimleri engelleyecek bir yöntem önerilmektedir. Önerilen yöntemin avantajları teorik olarak incelenmiş ve simulasyonlar ve prototip devreler aracılığıyla doğrulanmıştır.

Anahtar kelimeler: Endüksiyonlu ısıtma sistemleri, Rezonanslı inverter, Tek anahtarlı kısmi rezonanslı inverter, Yarı iletken anahtar, Aşırı gerilim koruma.

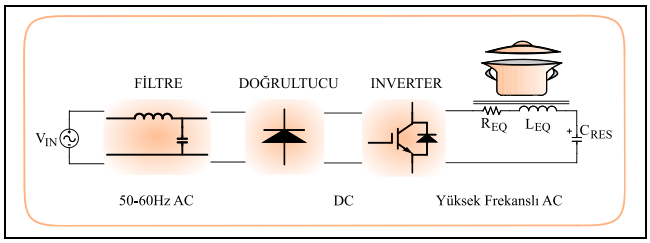
Abstract

Induction heating (IH) technology has found extensive use in residential applications in recent times, owing to its high efficiency, speed, and safe operation characteristics. Resonant inverter circuits are commonly employed in IH systems due to their high efficiency and soft-switching capabilities. Among various resonant inverters used in IH systems, the single-switch quasi-resonant (SSQR) inverter topology is preferred for low-cost and low-power applications. However, despite its cost advantages, the SSQR inverter has limitations, including a narrow operating range for soft-switching, challenges in power control, and higher stresses on semiconductor switches compared to other inverter applications. The most critical factors challenging the safe operation conditions of power electronic circuits are the high voltage and current stresses imposed on semiconductor switches. While all components of electronic circuits are affected by excessive current and voltage stresses, semiconductor switches, particularly in inverter applications, are the most vulnerable elements. Despite efforts to reduce excessive heat generated by overcurrent through forced cooling methods, semiconductor switches subjected to high voltages are prone to short-circuiting, rendering the circuit inoperable. This study proposes a method to mitigate the overvoltage stresses on semiconductor switches used in SSQR inverters for induction heating applications. The theoretical advantages of the proposed method have been investigated and verified through simulations and prototype circuits.

Keywords: Induction heating systems, Resonant inverter, Single switch quasi resonant inverter, Semiconductor switch, Over voltage protection.

1 Giriş

Son yıllarda endüksiyonlu ısıtma (EI) sistemleri, kullanıcı güvenliği, etkili ve hızlı ısıtma, ve kolay bakım gibi dikkate değer özellikleri nedeniyle endüstriyel, evsel ve tıbbi uygulamalarda önemini arttırmıştır [1]. Güç elektroniği ve elektronik alanındaki ilerlemeler, endüksiyon teknolojisinin gelişimine katkıda bulunmuştur [2]. Ev tipi endüksiyonlu pişirme ürünlerinde, bir veya daha fazla endüksiyon bobini, üzerine konulan tencereyi ısıtmak için vitro seramik cam bir yüzeyin altına yerleştirilir [3]. Endüksiyon bobini, tencereyi ısıtmak amacıyla aynı frekansta manyetik alan üreten bir alternatif akım ile beslenir. Tencere tabanında eddy akımlarının endüklenmesi sonucu ısıtma işlemi gerçekleştirilir [4]. EI sistemlerinin başlıca bileşenleri, AC-DC dönüşümü için bir doğrultucu ünite ve rezonanslı inverter üniteleridir [5]. Şekil 1, ev türü endüksiyonlu ocaklar için genel bir güç transfer döngüsünü göstermektedir.



Şekil 1. Genel güç transfer döngüsü.

Figure 1. General power transfer loop.

EI sistemlerinin kilit bir bileşeni olan güç dönüştürücüler, tek aşamalı ya da çift aşamalı yapılar şeklinde karşımıza çıkmaktadır [6]. Çift aşamalı sistemler, hem vC'den DC'ye hem de DC'den AC'ye dönüşümleri içerir [7]. Buna karşılık, tek aşamalı AC'den AC'ye sistemlerde bir doğrultucu ünitesi bulunmamaktadır. Bu sistemler, giriş AC voltajını doğrudan

*Yazışılan yazar/Corresponding author

dönüştürenler ve onu yükseltenler olmak üzere iki gruba ayrılabilir.

Ayrıca, EI sistemleri, tek veya çoklu yük/bobin içerecek şekilde tasarlanabilir. Geçmiş yıllarda, tek bobinli sistemler endüstriyel ve evsel endüksiyon uygulamalarında yaygın olarak kullanılmıştır. Son dönemlerde ise çok çıkışlı endüksiyon ısıtıcıları, ayarlanabilir pişirme yüzeyleri aracılığıyla performansı artırmaya yönelik öneriler getirmiştir [8]-[10]. Farklı bobin modellerinin seçimi, tasarım gereksinimleri, maliyet, çıkış gücü ve ocak geometrisi gibi faktörlere bağlıdır. Tencere boyutu ve bobin tasarımına dayalı olarak pişirme yüzeylerini yapılandırmak için çeşitli yaklaşımlar kullanılmaktadır [11]. Genellikle ferromanyetik malzemeden yapılmış tencereler yük olarak kullanılırken, son zamanlarda yapılan çalışmalar aynı zamanda ferromanyetik olmayan metal malzemeden yapılmış tencere modellerini de incelemiştir [12]-[14].

Maliyet ve performans arasındaki dengeye bağlı olarak farklı rezonanslı inverter topolojileri önerilmiştir. EI sistemlerinde kullanılan en yaygın inverter topolojileri yarım köprü seri rezonanslı (HBSR) [15]–[19] ve tek anahtarlı kısmi rezonanslı (SSQR) [20], [21] inverterlerdir. SSQR inverter topolojisi, düşük güç ve düşük maliyetli EI uygulamaları için güvenilir bir çözüm sunar. Ancak, kısmi rezonans inverter devresinin temel dezavantajı, gücün HBSR inverter devrelerinde olduğu gibi frekans kontrollü bir şekilde yüke transfer edilememesidir. Bu sınırlama, SSQR inverterin çalışma modlarının RL ve RLC devreleri arasında geçiş yapmasından kaynaklanmaktadır [22]. Yarı iletken anahtarın iletimde olduğu RL çalışma aralığında bobine aktarılan enerji, anahtarın kesime girmesi ile birlikte resonans kondansatörüne aktarılarak bobin ve kondansatör arasında rezonans başlamasına neden olacaktır. Kondansatör gerilimi DC kaynak gerilimine ulaştığında ise yarı iletken anahtara ters paralel bağlı diyot iletime girerek bir sonraki anahtarlama periyodu için yumuşak anahtarlamanın oluşmasını sağlayacaktır. Ancak ev tipi EI sistemlerinde kullanıcının tencere tercihine bağlı olarak RLC devresinin karakteristiği değişmektedir. Bunun sonucu olarak da özellikle anahtarın iletime ve kesime girdiği geçiş anlarında anlık yüksek gerilim ve akımlar oluşabilmektedir. Bu ve benzeri akım ve gerilim yükselmelerinin önüne geçebilmek amacıyla, yarı iletken anahtarın açma ve kapama zamanlarını belirlemek için kapalı çevrim kontrol algoritmaları kullanılmaktadır.

SSQR inverter kullanan EI sistemlerinde yük parametreleri, yarı iletken anahtarın akım ve gerilim sınırları, yarı iletken anahtarın açma ve kapanma süreleri ile kapalı çevrim güç kontrol metodları arasında önemli bir ilişki bulunmaktadır. Dahası, SSQR inverterli EI sistemlerinde rezonant devre elemanlarının modellemesi amacıyla kullanılan bobin eşdeğer endüktans ve eşdeğer direnç değerlerini belirlemek çok kolay değildir. Ayrıca, bu değerler, rezonanslı inverter devresinin çalışma frekansı, çevresel sıcaklık ve tencere ile bobin arasındaki hava boşluğu gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle, geniş bir akademik araştırma yelpazesi, yalnızca tencere ve yük tanıma üzerine odaklanmaktadır [23]–[25]. Diğer taraftan, sadece bobin tasarımı bile tek başına kapsamlı bir akademik araştırmayı gerektirmektedir. Özellikle manyetik alan bağlamında birçok çalışma, bobin tasarımı üzerine yapılmıştır [26],[27].

Güç elektroniği devrelerindeki güvenli çalışma koşullarını zorlayan en önemli unsurlar, yarı iletken anahtarların maruz kalacağı yüksek gerilim ve yüksek akımlardır. Bununla birlikte elektronik devrelerin tüm bileşenleri aşırı akım ve aşırı gerilim stresinden etkilense de, invertör uygulamalarında en savunmasız elemanlar yarı iletken anahtarlardır. Aşırı akımın ürettiği aşırı ısı, zorlamalı soğutma yöntemleriyle azaltılabilse bile, yüksek gerilimlere maruz kalan yarı iletken anahtarlar, muhtemelen kısa devre olacak ve devre çalışamaz hale gelecektir. Bu nedenle literatürde özellikle IGBT yarı iletken elemanını yüksek gerilimlerden korumak amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir [28]–[30]. [28] ile verilen çalışmada, parazitik endüktans kaynaklı oluşan yüksek gerilimlerin IGBT yarı iletken devre elemanına zarar vermemesi için geliştirilen bir güç elektroniği devresinden bahsedilmektedir. [29] ile verilen çalışmada da benzer şekilde IGBT yarı iletken anahtarının kesime gitme anında oluşan gerilim yükselmelerinin engellenmesi amacıyla önerilen aşırı gerilim koruma devresi önerilmektedir. [30] ile verilen çalışmada ise bir önceki örneklere benzer şekilde zener diyot ve TVS lerden oluşan bir donanım devresi yardımıyla IGBT uç geriliminin bastırılması amaçlanmaktadır.

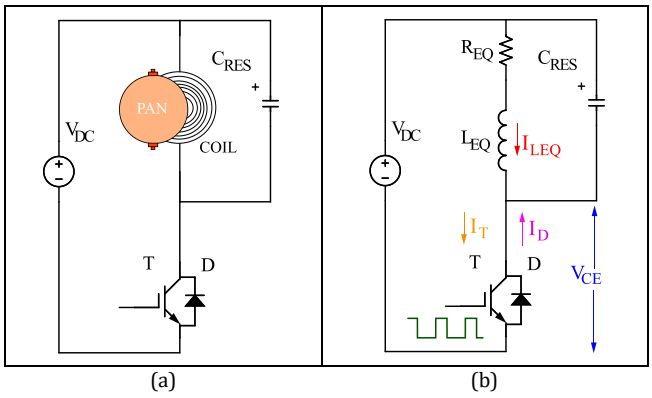
EI sistemlerinde kullanılan çeşitli rezonanslı inverterler arasında SSQR inverter topolojisi düşük maliyetli ve düşük güç gerektiren uygulamalar için tercih edilmektedir. Ancak, SSQR inverter, maliyet avantajına rağmen, yumuşak anahtarlama ile çalışabildiği güç aralığının dar oluşu, güç kontrolünün zorluğu ve yarı iletken anahtarlarda oluşan akım ve gerilim zorlanmalarının diğer inverter uygulamalarına kıyasla yüksek olması gibi dezavantajları barındırır. Bu çalışmada EI'da kullanılan SSQR inverter için yarı iletken anahtarların maruz kaldığı aşırı gerilimleri engelleyecek etkili bir yöntem önerilmektedir. Önerilen yöntem literatürde karşılaşılan donanımsal koruma devrelerine ilaveten mikrodenetleyici destekli ilave yazılım korumalarını da içermektedir. Bu sayede hem geçici hem de kalıcı hal durumlarında IGBT uç gerilimleri kontrol altına alınmış olacaktır. Ayrıca yalnızca donanımsal koruma devresi ya da bastırma devresi içeren yöntemlerin neden olabileceği IGBT ısınma problemlerinin de önüne geçilecektir. Önerilen yöntem yardımıyla, düşük maliyetli ve güvenilir EI sistemlerinin tasarımına yönelik önemli bir adım atılmış olacaktır.

Çalışmanın geri kalanı şu şekilde yapılandırılmıştır: Bölüm 2'de SSQR invertör dönüştürücü devre denklemleri yardımıyla anlatılmaktadır. Bölüm 3'te SSQR inverter için güvenli çalışma bölgesi ayrıntılı olarak anlatılmaktadır. Bölüm 4'te önerilen ayrıntılı koruma yöntemi anlatılmakta, sonrasında sırasıyla simülasyon (benzetim) çalışmaları ve deneysel sonuçlar gösterilmektedir. Bu çalışmanın sonucu Bölüm 5'te verilmektedir.

2 SSQR inverterli devrenin tanımlanması

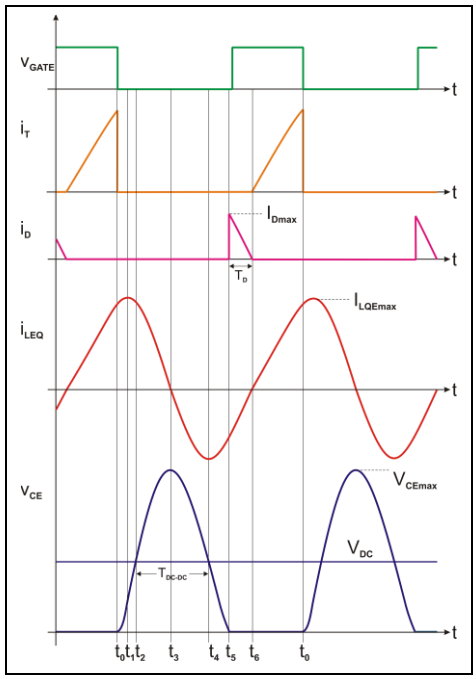
2.1 Genel

Tek anahtarlı yarı rezonanslı invertere ait devre diyagramı ve devre şeması, Şekil 2 'de ve invertere ait akım ve gerilim dalga şekilleri ise Şekil 3'te verilmektedir. Devre şeması incelendiğinde, T yarı iletken anahtarı, D serbest geçiş diyotunu, R_{EQ} eşdeğer direnci, L_{EQ} eşdeğer endüktansı ve C_{RES} rezonans kondansatörünü belirtmektedir. T anahtarı iletime girdiğinde, devre seri RL devresi gibi davranır. Bu aşamada bobin, anahtar iletim süresi t_{ON} boyunca R_{EQ} direnci üzerinden enerji biriktirir. Başka bir ifade ile yarı iletken anahtar devrede olduğu sürece süresi boyunca bobin, V_{DC} gerilim kaynağı tarafından sağlanan enerjiyi biriktirmektedir.



Şekil 2. SSQR inverter. (a): Devre diyagramı. (b): Devre şeması.

Figure 2. SSQR inverter. (a): Circuit diagram. (b): Circuit schematics.



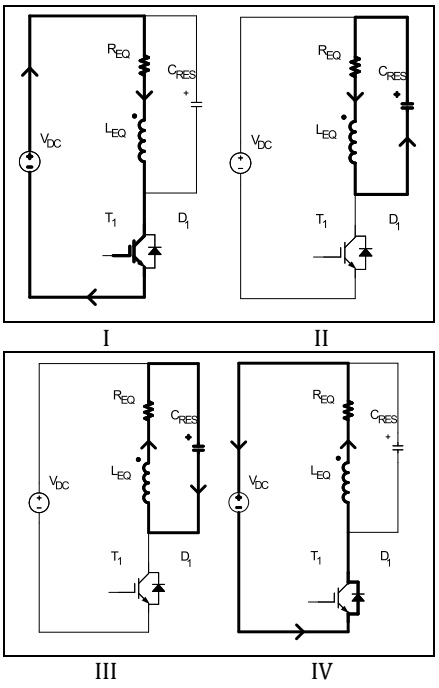
Şekil 3. SSQR invertere ait akım ve gerilim dalga şekilleri.

Figure 3. Current and voltage waveforms for SSQR inverter.

T yarı iletken anahtarı kesime götürüldüğünde devre, seri RLC devresi olarak çalışmaya başlar. Bu çalışma modunda, bobin ve kondansatör arasında rezonans oluşur ve enerji alışverişi sağlanır. Bobinde biriken enerji, C_{RES} rezonans kondansatörüne aktarıldığı anda, T anahtar uç gerilimi V_{CE}, V_{CEMAX} değerine ulaşır. Rezonansın sonunda C_{RES} kondansatörü, kaynak gerilimi ile şarj olduğunda ise V_{CE} gerilimi sıfır olacaktır. Eş zamanlı olarak, yarı iletken anahtar T yeniden etkinleştirilerek yumuşak anahtarlama sağlanmış olacaktır [31]–[34].

2.2 Devre çalışma modları–devre denklemleri

SSQR inverterin çalışma modları, Şekil 4'te gösterilen dört temel kısımda incelenmektedir. T yarı iletkeninin iletimde olduğu $t_6 < t < t_0$ aralığı R_{EQ} ve L_{EQ} bileşenlerini içeren bir seri RL devresi olarak modellenmektedir. Buna ek olarak, $t_0 < t < t_5$ zaman aralığı, L_{EQ} ve C_{RES} arasındaki rezonanslı içeren bir seri RLC devresi olarak analiz edilmektedir. Son olarak, D serbest geçiş diyotunun iletimde olduğu $t_5 < t < t_6$ aralığı seri RL devresi olarak modellenmektedir.



Şekil 4. SSQR inverter için devre çalışma aralıkları. (I): RL çalışma aralığı. (II): RLC çalışma aralığı. (III): RLC çalışma aralığı. (IV): RL çalışma aralığı.

Figure 4. Working modes for SSQR inverter. (I): RL working mode. (II): RLC working mode. (III): RLC working mode. (IV): RL working mode.

SSQR inverterin dört çalışma aralığından 2 ve 3 aralığının seri RLC devresi, 1 ve 4 aralığının ise seri RL devresi olarak modellenmesinden dolayı, HBSR inverterde olduğu gibi frekans domeninde incelemek yerine zaman domeninde değerlendirmek daha anlamlı olmaktadır. Devre analiz edilirken, sadeleştirme açısından sürekli hal analiz edilmekte, rezonans kondansatörünün deşarj akımı ve benzer geçici durumlar bilinçli bir şekilde göz ardı edilmektedir.

Aralık I$(t_6 - t_0)$: Bu aralık, T yarı iletken anahtarının sıfır gerilim koşullarında iletime girmesi (ZVT) ile başlar ve T anahtarı kesime götürülene kadar devam eder. RL devresinin işleyişiyle ilgili olarak, aşağıdaki denklemler (1)-(3) şeklinde formüle edilebilir [35].

$$i_{LEQ}(t_6) = 0 \tag{1}$$

$$i_{LEQ}(t) = i_T(t) = V_{DC}/R_{EQ} \cdot (1 - e^{-\frac{R_{EQ}}{L_{EQ}}t}) \tag{2}$$

$$V_{DC} = V_{LEQ} + V_{REQ} \tag{3}$$

Aralık II-III$(t_0 - t_5)$: Bu aralık, T yarı iletken anahtarının kesime götürülmesi ile başlar. L_{EQ} ve C_{RES} arasındaki rezonans olayı bir seri RLC devresi olarak analiz edilir. Ayrıca, I_{LEQ} akımını analiz etmek üzere denklem (4)-(7) kullanılabilir [35].

$$i_{LEQ}(t) = e^{-\alpha t}(B_1 cos(\omega_d t) + B_2 sin(\omega_d t)) \tag{4}$$

$$i_{LEQ}(t_0) \Longrightarrow B_1 = I_0 \tag{5}$$

$$\frac{di_{LEQ}(t)}{dt} = -e^{-\alpha t}[(B_1\omega_d + B_2\alpha)sin(\omega_d t) + (B_1\alpha - B_2\omega_d)cos(\omega_d t)] \quad (6)$$

$i_{LEQ}(t_0)/dt \implies$

$$B_2 = ((V_{DC} - R_{EQ}I_0))/(L_{EQ}\omega_d) + (\alpha I_0)/\omega_d \quad (7)$$

Ayrıca, bahsedilen denklemler, devre denklemleri (8)-(11) ile birlikte kullanılarak Şekil 3'te gösterilen yarı iletken anahtarın uç gerilimi V_{CE}'yi hesaplamak için kullanılabilir.

$$v(t) = V_{DC} + e^{-\alpha t}(A_1 cos(\omega_d t) + A_2 sin(\omega_d t)) \quad (8)$$

$$dv(t)/dt = -e^{-\alpha t}[(A_1\omega_d + A_2\alpha)sin(\omega_d t) + (A_1\alpha - A_2\omega_d)cos(\omega_d t)] \quad (9)$$

$$v(t_0) \implies A_1 = -V_{DC} \quad (10)$$

$$dv(t_0)/dt \implies A_2 = (I_0/C_{RES} - \alpha V_{DC})/\omega_d \quad (11)$$

Aralık IV $(t_5 - t_6)$: Bu aralık, T güç anahtarına ters paralel bağlı D diyotunun iletime girmesi ile başlar. Şekil 3'te gösterildiği gibi, enerji kaynağından geçen akım çevrimini D güç diyodu üzerinden tamamlar. RL devresinin işleyişiyle ilgili olarak denklemler (12)-(15) verilmektedir. Diyot iletim süresi, t_D $(t_6 - t_5)$ ve tepe diyot akımı I_{Dmax} olarak adlandırılır.

$$i_{LEQ}(t) = V_{DC}/R_{EQ} + (I_{Dmax} - V_{DC}/R_{EQ})e^{-\frac{R_{EQ}}{L_{EQ}}t} \quad (12)$$

$$i_{LEQ}(t_D) = 0 = \frac{V_{DC}}{R_{EQ}} + (I_{Dmax} - \frac{V_{DC}}{R_{EQ}})e^{-\frac{R_{EQ}}{L_{EQ}}t_D} \quad (13)$$

$$t_D = \ln[\frac{V_{DC}/R_{EQ}}{V_{DC}/R_{EQ} - I_{Dmax}}](-\frac{L_{EQ}}{R_{EQ}}) \quad (14)$$

$$t_D = -\frac{L_{EQ}}{R_{EQ}} \cdot ln\left(1 + \frac{I_{Dmax}}{V_{DC}/R_{EQ} - I_{Dmax}}\right) \quad (15)$$

3 SSQR inverter için güvenli çalışma bölgesi

Her bir çalışma aralığı için tanımlanmış detaylı devre denklemleri incelendiğinde, R_{EQ}, L_{EQ} ve C_{RES} değerlerinin, SSQR inverterin güvenli çalışma bölgesinin belirlenmesi açısından büyük öneme sahip oldukları açıktır. Güç elektroniği devrelerinde güvenli çalışmayı tehdit eden temel sorunlar, yarı iletken anahtarların maksimum çalışma değerlerini aşan yüksek gerilim ve yüksek akımlardır. Elektronik devrelerin tüm bileşenleri aşırı akım ve aşırı gerilim stresinden etkilenebilirken, yarı iletken anahtarlar, inverter uygulamalarında en savunmasız elemanlar olarak ön plana çıkar. Aşırı akımlar tarafından oluşturulan fazla ısı, zorlamalı soğutma yöntemleri yardımıyla azaltılabilir, ancak yarı iletkenlerin bozulma limitlerini aşan gerilimlere maruz kalmaları, onları hızla çalışmaz hale getirebilir.

Aralık IV' te ayrıntılı olarak verildiği gibi L_{EQ} ve C_{RES} arasındaki rezonansın tamamlanması sonucu, anahtar uç geriliminin sıfır değerine ulaşması ile birlikte yarı iletken anahtara paralel bağlı D diyotunun iletime girmesi öngörülmektedir. Ancak bu durum her koşulda mümkün olamamakta, yarı iletken anahtar devreye girerken, anlık yüksek C_{RES} kondansatörü deşarj akımlarına maruz kalmaktadır (I_{T-LL}). SSQR inverter devrelerinde sıkça gözlemlenen C_{RES} kondansatörünün anlık deşarj akımları hem yarı iletkenlerin hem de güç elektroniği devrelerinin güvenilir çalışması için bir tehdit oluşturur. Bu anlık akımlar, hafif yük akımları olarak da adlandırılır ve yarı iletkenin nominal maksimum akımını üç ile dört kat aşabilir, aşırı ısınma, elektriksel gürültü ve benzeri sorunlara neden olabilir.

Diğer taraftan,yalnızca R_{EQ}, L_{EQ} ve C_{RES} değerleri değil aynı zamanda kapalı çevrim güç kontrol teknikleri de SSQR inverter açısından güvenilir çalışma bölgesinde kalabilmek adına önemli bir rol oynar. SSQR inverter incelendiğinde, çalışma modlarının RL ve RLC devreleri arasında salınım yaptığı görülmektedir. Bu nedenle, yarı iletken anahtarların iletim ve kesim sürelerini belirlemek için kapalı çevrim kontrol yöntemlerinin uygulanması kaçınılmaz hale gelir. Isıtılacak malzemenin özelliklerine, V_{DC} kaynak gerilim değerine ve inverter devre elemanlarının parametrelerine bağlı olarak, yarı iletken anahtarın açma veya kapatma sürelerindeki 1 µs'yi aşan hatalı hesaplamalar (yaklaşık %5 lik bir sapma anlamına gelir), anahtarlama kayıplarını arttıracak, bunun sonucu olarak da, aşırı ısınma veya aşırı gerilimler nedeniyle yarı iletken anahtar kısa devre olarak çalışamaz hale gelecektir.

3.1 Akım sınır koşullarının hesaplanması

SSQR inverter tasarımında sınır koşullarını tanımlamak son derece önemlidir. Çalışma aralığı II ve III (seri RLC devre modu) sırasında bobin akımı I_{LEQ} ve anahtar uç gerilimi V_{CE} maksimum değerlerine ulaşırlar. Bu iki parametre hakkındaki bilgi, tasarımcı açısından sadece güvenilir çalışma koşulları için değil, aynı zamanda güç gibi kontrol sistem parametrelerini belirleme açısından da çok önemli ve değerlidir. Şekil 3'ten de görülebileceği gibi, bobin akımı I_{LEQ}'nun maksimum değeri I_{LEQMAX}'a ulaştığında, I_{LEQ} akımının türevi sıfırdır (t = t_1). Bu nedenle, maksimum bobin akımı I_{LEQMAX}, (16)-(18) denklemleri yardımıyla türetilir.

$$di_{LEQ}(t_1)/dt = 0 \implies i_{LEQ}(t_1) = I_{LEQMAX} \quad (16)$$

$$t_1 = tan^{-1}[-(B_1\alpha - B_2\omega_d)/(B_1\omega_d + B_2\alpha)])/\omega_d \quad (17)$$

$$\boldsymbol{I_{LEQMAX}} = i_{LEQ}(t_1) = e^{-\alpha t_1}(B_1 cos(\omega_d t_1) + B_2 sin(\omega_d t_1)) \quad (18)$$

Ancak burada gözden kaçırılmaması gereken en önemli ayrıntı, ilgili denklemler yardımıyla bobin ve yarı iletkenden geçen maksimum nominal akım değerinin tespit edilebileceğidir. Anahtarlama kaybı açısından kritik öneme sahip anlık en yüksek yarı iletken anahtar akım değerinin tespiti ise daha karmaşık bir çalışma gerektirir. Öncelikle rezonansın tamamlandığı t_5 anındaki V_{CE} gerilim değeri hesaplanmalı, sonrasında ise C_{RES} değeri ve deşarj süresi kullanılarak I_{T-LL} hesaplanmalıdır. Bunun için (19) ve (20) denklemleri kullanılabilir.

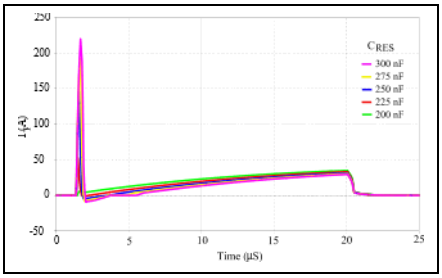
$$\boldsymbol{V_{CEMIN}} = v(t_5) = V_{DC} + e^{-\alpha t_5}(A_1 cos(\omega_d t_5) + A_2 sin(\omega_d t_5)) \quad (19)$$

$$\boldsymbol{I_{T-LL}} = C_{RES} \cdot \Delta V/\Delta t = C_{RES} \cdot V_{CEMIN}/\Delta t \quad (20)$$

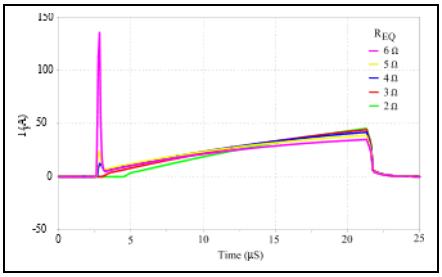
Δt süresini tespit edebilmek, rezonans kondansatörü, yarı iletken anahtar ve akım çevriminde yer alan tüm iletken yolların iç direncine bağlı olduğu için çok kolay değildir.

Ancak, pratik ölçümlerde 100-300ns mertebesinde olduğu gözlemlenmiştir.

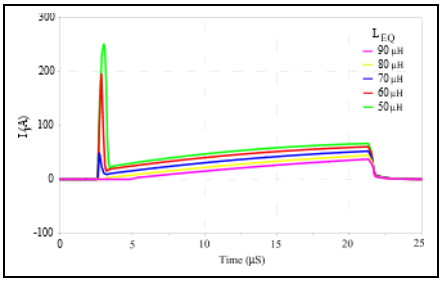
PSpice simülasyon programı kullanılarak, çeşitli rezonans devre parametre değerlerine bağlı yarı iletken anahtarın I_T akım değerindeki değişimler, Şekil 5'te verilmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5. PSpice programı yardımıyla elde edilen I_T anahtar akımı değişimleri. (a): $R_{EQ} = 3\ \Omega$, $L_{EQ} = 80\ \mu H$ ve C_{RES} değeri değişken. (b): $C_{RES} = 270\ nF$, $L_{EQ} = 80\ \mu H$ ve R_{EQ} değeri değişken. (c): $R_{EQ} = 3\ \Omega$, $C_{RES} = 270\ nF$ ve L_{EQ} değeri değişken.

Figure 5. I_T semiconductor switch current waveforms from the Pspice simulation program. (a): $R_{EQ} = 3\ \Omega$, $L_{EQ} = 80\ \mu H$ and C_{RES} is changing. (b): $C_{RES} = 270\ nF$, $L_{EQ} = 80\ \mu H$ and R_{EQ} is changing. (c): $R_{EQ} = 3\ \Omega$, $C_{RES} = 270\ nF$ and $L_{EQ}$is changing.

3.2 Gerilim sinir koşullarının hesaplanması

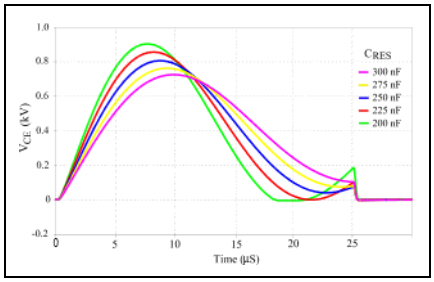
SSQR inverterli endüksiyon ocağın maksimum güç seviyesi, yarı iletken anahtarının maksimum gerilim dayanım değeri ile sınırlıdır. Anahtar uç gerilimi maksimum V_{CEMAX} değerine ulaştığında, rezonans akımı yön değiştirecektir ve dolayısıyla I_{LEQ} akımı sıfırdır ($t = t_3$). Bunun sonucunda (21)-(23) denklemleri yardımıyla maksimum anahtar uç gerilimi V_{CEMAX} elde edilmektedir.

$$i_{LEQ}(t_3) = 0 \implies v(t_3) = V_{CEMAX} \tag{21}$$

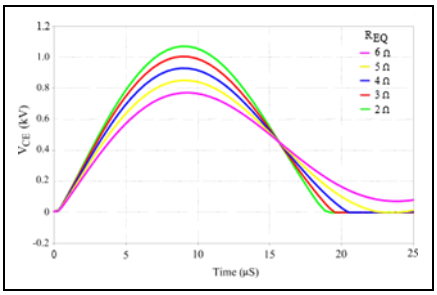
$$t_3 = tan^{-1}(-B_1/B_2)/\omega_d \tag{22}$$

$$\boldsymbol{V_{CEMAX}} = v(t_3) = V_{DC} + e^{-\alpha t_3}(A_1 cos(\omega_d t_3) + A_2 sin(\omega_d t_3)) \tag{23}$$

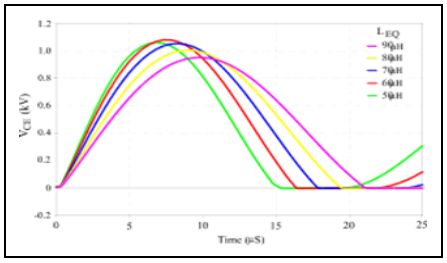
PSpice simülasyon programı kullanılarak, çeşitli rezonans devre parametre değerlerine bağlı yarı iletken anahtarın V_{CE} uç gerilimindeki değişimler Şekil 6'da verilmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 6. PSpice programı yardımıyla elde edilen V_{CE} anahtar gerilimi değişimleri. (a): $R_{EQ} = 3\ \Omega$, $L_{EQ} = 80\ \mu H$ ve C_{RES} değeri değişken. (b): $C_{RES} = 270\ nF$, $L_{EQ} = 80\ \mu H$ ve R_{EQ} değeri değişken. (c): $R_{EQ} = 3\ \Omega$, $C_{RES} = 270\ nF$ ve L_{EQ} değeri değişken.

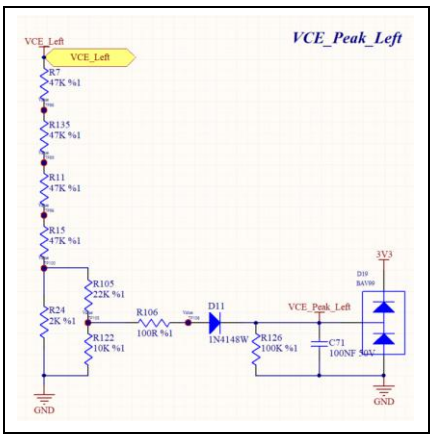
Figure 6. V_{CE} semiconductor switch voltage waveforms from the Pspice simulation program. (a): $R_{EQ} = 3\ \Omega$, $L_{EQ} = 80\ \mu H$ and C_{RES} is changing. (b): $C_{RES} = 270\ nF$, $L_{EQ} = 80\ \mu H$ and R_{EQ} is changing. (c): $R_{EQ} = 3\ \Omega$, $C_{RES} = 270\ nF$ and L_{EQ} is changing.

4 SSQR Inverterde yariiletken anahtar geriliminin limitlenmesi

Elektronik devrelerin tüm bileşenleri aşırı akım ve aşırı gerilim stresinden etkilense de, invertör uygulamalarında en savunmasız elemanlar yarı iletken anahtarlardır. Aşırı akımın ürettiği aşırı ısı, zorlamalı soğutma yöntemleriyle azaltılabilse bile, yüksek gerilimlere maruz kalan yarı iletken anahtarlar, muhtemelen kısa devre olacak ve devre çalışamaz hale gelecektir. Bu çalışmada EI'da kullanılan SSQR inverter için yarı iletken anahtarların maruz kaldığı aşırı gerilimleri engelleyecek bir yöntem önerilmektedir. Önerilen yöntem önce simulasyon programları yardımıyla test edildikten sonra sonra uygulama devresi yardımıyla doğrulanmaktadır.

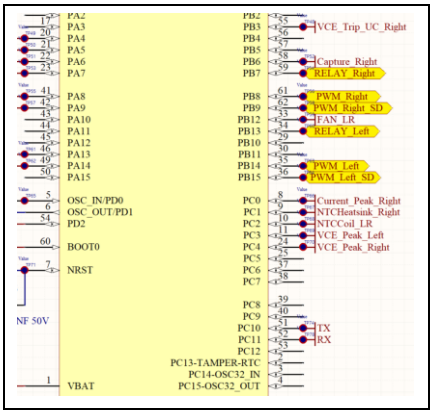
Yarı iletken anahtar uçlarında oluşması muhtemel yüksek gerilimler, kararlı hal ve geçici hal olmak üzere 2 ana kısımda

incelenmelidir. Kararlı hal durumunda anahtar uç gerilimden bir gerilim bölücü devre yardımıyla alınan gerilim örnekleri, mikrodenetleyicilerin ADC (Analog to Digital Converter) bloklarında değerlendirilerek, olası bir gerilim yükselmesinin önüne geçilmektedir. Ev türü beyaz eşya uygulamalarında genel olarak Arm tabanlı 32 bit, 128KB flash içeren, 12 adet Timer ünitesi bulunan, 16 adet ADC kanalı içeren, USART ve SPI benzeri haberleşme protokolleri içeren, 72 MHz çalışma frekansına çıkabilen mikrodeneteyiciler kullanılmaktadır. Ayrıca 12 bit ADC, 16'ya kadar harici kanala sahiptir ve tek okuma veya tarama modlarında okumalar gerçekleştirmektedir. Şekil 7'de V_{CE} yarı iletken anahtar gerilimini algılayabilmek amacıyla kullanılan örnek gerilim bölücü devre şeması ve Şekil 8'de V_{CE} yarı iletken anahtar gerilimini algılayabilmek amacıyla kullanılan örnek mikrodenetleyici devre şeması gösterilmektedir.



Şekil 7. V_{CE} yarı iletken anahtar gerilimini algılayabilmek amacıyla kullanılan örnek gerilim bölücü devre şeması.

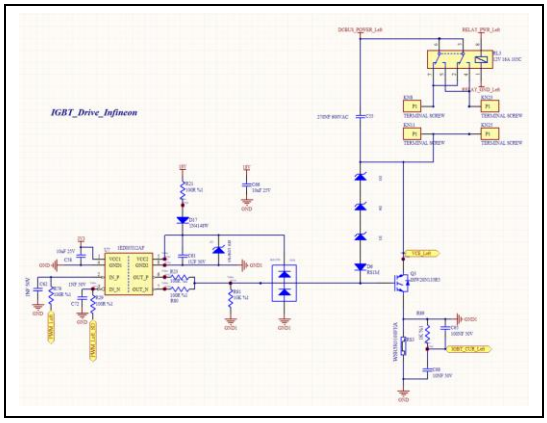
Figure 7. Sample voltage divider circuit diagram used to detect the V_{CE} semiconductor switch voltage.



Şekil 8. V_{CE} yarı iletken anahtar gerilimini algılayabilmek amacıyla kullanılan örnek mikrodenetleyici devre şeması.

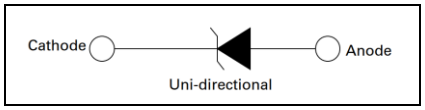
Figure 8. Sample microcontroller circuit diagram used to detect the V_{CE} semiconductor switch voltage.

Mikrodenetleyici tabanlı koruma yöntemi kararlı haldeki bir sistem için son derece güvenli ve anlamlı olmakla birlikte, geçici hal durumlarındaki anlık gerilim yükselmelerini engellemekte zorlanır. Geçici hal tanımının içine yıldırım ve benzeri elektrik dağıtımı kaynaklı anlık ve kısa süreli darbeler girebileceği gibi, güç kontrolü sırasında oluşması muhtemel hatalar ve sürücü devre kaynaklı riskler girebilir. Kararlı hal durumundaki yarı iletken gerilim kontrolüne ek olarak geçici hal durumlarında kısa süreli darbeleri sönümleyebilecek ilave bir devre tasarımına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla Geçici Gerilim Bastırıcılar (TVS) adı verilen ve zener diyot ile benzer bir çalışma ilkesine sahip yarı iletkenler kullanılabilir. Kullanılan TVS devre elemanının değerine bağlı olarak V_{CE} gerilimi belirli bir değerin üzerine çıktığında yarı iletken anahtar I_{GATE} akımı ile iletime girecek ve anahtar uç geriliminin yükselmesine izin verilmeyecektir. Önerilen çalışmada V_{CE} gerilim değerinin $1200V_{DC}$' yi geçmemesi hedeflenmiştir. Bu noktada unutulmaması gereken en önemli ayrıntı, geçici haldeki anlık gerilim yükselmesini engellemek için kullanılan TVS devresinin, kararlı halde iletime girmesinin engellenmesidir. Aksi takdirde yarı iletken anahtarda istenmeyen ve kontrolsüz akım ve gerilim işaretleri oluşmaya başlayacaktır. Başka bir deyişle geçici hal anahtar gerilim yükselmeleri TVS devresi ile sönümlenirken, kararlı hal anahtar gerilim yükselmeleri gerilim bölücü ve ADC'den oluşan kontrol bloğu tarafından kontrol edilmelidir. Şekil 9'da V_{CE} gerilimin değerine bağlı olarak yarı iletken anahtarın iletime girmesini sağlayan örnek bir TVS'li devre şeması ve Şekil 10'da örnek bir TVS devre elemanına ait fonksiyonel diyagram ve I-V karakteristiği gösterilmektedir.

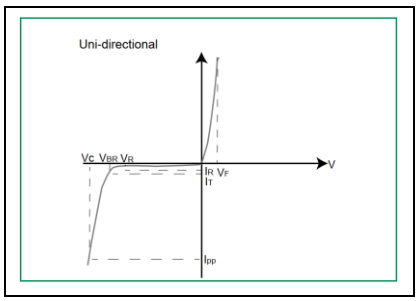


Şekil 9. V_{CE} gerilimine bağlı yarı iletken anahtarı iletime sokan örnek TVS devre şeması.

Figure 9. Sample TVS circuit diagram that activates the semiconductor switch depending on the V_{CE} voltage value.



(a)



(b)

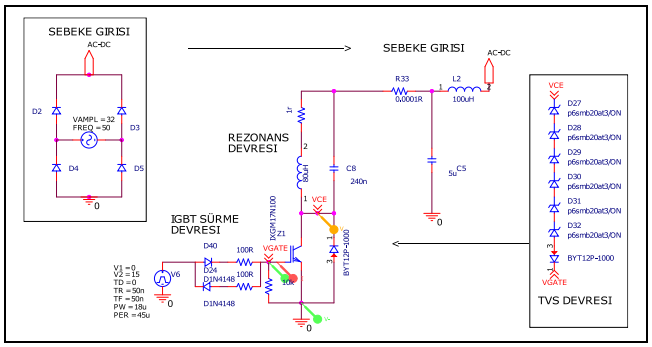
Şekil 10. Örnek bir TVS devre elemanına ait (a): Fonksiyonel diyagramı. (b): I-V karakteristiği.

Figure 10(a): Functional diagram. (b): I-V characteristic of an example TVS circuit element.

4.1 Simulasyon devresi sonuçları

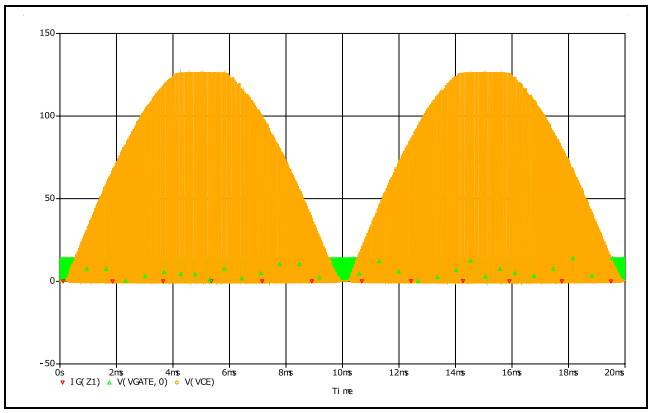
Anlık gerilim yükselmelerini engelleyebilmek amacıyla önerilen TVS'li devrenin nasıl çalıştığını inceleyebilmek amacıyla Pspice (OrCAD Capture–Lite version 17.2-2016) benzetim programından yararlanılmıştır. Pratik uygulamada 3 adet seri bağlı 400V devrilme gerilimine sahip P6SMB400 kullanılarak V_{CE} gerilim değerinin 1200V_{DC}'yi geçmemesi hedeflenmektedir. Ancak benzetim çalışmalarında 6 adet 20V devrilme gerilimine sahip P6SMB20AT3G yarı iletkeni seri bağlanarak V_{CE} gerilim değerinin 120V_{DC}'yi geçmemesi hedeflenmiştir. Şebeke gerilimi de 230V_{AC} yerine 23V_{AC} seçilerek benzetim çalışmasında gerçeğe en yakın ancak 1/10 oranında sayısal olarak küçültülmüş versiyonu incelenmiştir. Şekil 11'de benzetim devresi için kullanılan devre şeması, Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14'te ise ilgili devre yardımıyla elde edilen yarı iletken anahtar uç gerilimi V_{CE}, anahtar sürme gerilimi V_{GATE} ve yarı iletken anahtar sürme akımı I_{GATE} gösterilmektedir.

Şekil 11 dikkatlice incelendiğinde, AC şebeke gerilimi önce köprü diyot yardımıyla doğrultulur. Tencereden oluşan ısıtma sistemi RL devresi şeklinde modellenir. Mikro işlemci ve sürme devresini modellemek için darbe generatörü kullanılır. Yarı iletken anahtarın uç geriliminin yükselmemesi için de TVS devresi eklenmiştir.



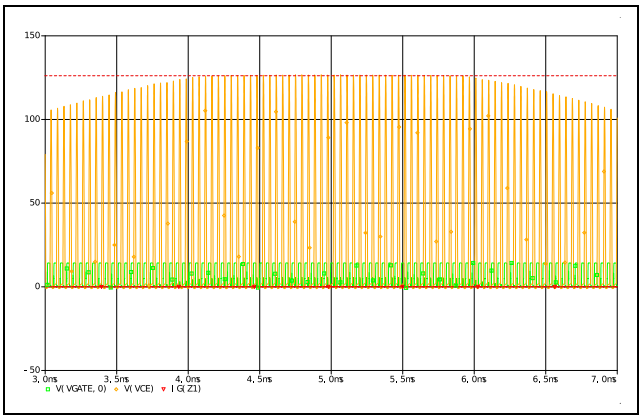
Şekil 11. Orcad PSpice benzetim devresi şeması.

Figure 11. Orcad PSpice simulation circuit diagram.



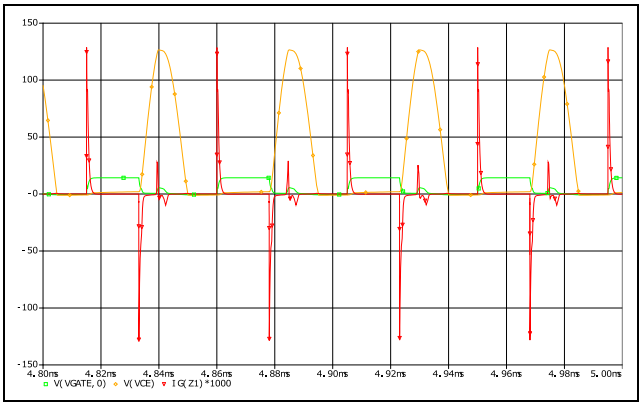
Şekil 12. Benzetim devresinden elde edilen detaylı dalga şekilleri. Turuncu sinyal: V_{CE} yarı iletken anahtar uç gerilimi. Yeşil sinyal: V_{GATE} anahtar sürme gerilimi. Kırmızı sinyal: I_{GATE} anahtar sürme akımı.

Figure 12. Detailed waveforms obtained from the simulation circuit. Orange signal: V_{CE} semiconductor switch voltage. Green signal: V_{GATE} switch gate drive voltage. Red signal: I_{GATE} switch gate drive current.



Şekil 13. Benzetim devresinden elde edilen detaylı dalga şekilleri. Turuncu sinyal: V_{CE} yarı iletken anahtar uç gerilimi. Yeşil sinyal: V_{GATE} anahtar sürme gerilimi. Kırmızı sinyal: I_{GATE} anahtar sürme akımı.

Figure 13. Detailed waveforms obtained from the simulation circuit. Orange signal: V_{CE} semiconductor switch voltage. Green signal: V_{GATE} switch gate drive voltage. Red signal: I_{GATE} switch gate drive current.



Şekil 14. Benzetim devresinden elde edilen detaylı dalga şekilleri. Turuncu sinyal: V_{CE} yarı iletken anahtar uç gerilimi. Yeşil sinyal: V_{GATE} anahtar sürme gerilimi. Kırmızı sinyal: I_{GATE} anahtar sürme akımı (x 1000).

Figure 14. Detailed waveforms obtained from the simulation circuit. Orange signal: V_{CE} semiconductor switch voltage. Green signal: V_{GATE} switch gate drive voltage. Red signal: I_{GATE} switch gate drive current (x 1000).

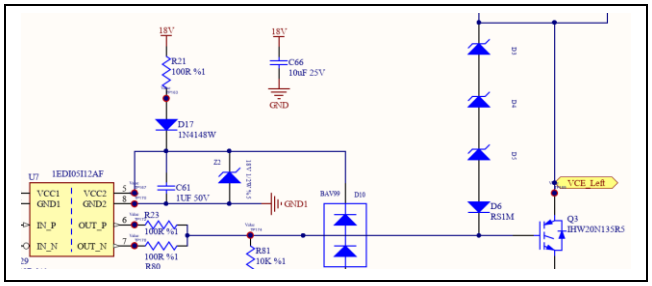
Şekil 12 ve Şekil 13 detaylı incelendiğinde ise anahtar uç gerilim değerinin 120V_{DC} değerini aşamadığı görülmektedir. Bunun nedeni ise 120V_{DC} değerinden sonra TVS devresinin iletime girmesi ve yarı iletken anahtarın iletime girmesini sağlamasıdır. Özellikle Şekil 13 detaylı incelendiğinde, yeşil renk ile gösterilen V_{GATE} sürme sinyallerinin uygulanması ve sinyalin kesilmesi anlarında oluşan ve kırmızı renk ile gösterilen I_{GATE} yarı iletken anahtar akımlarının TVS devrilmesi kaynaklı olarak da oluştuğu görülmektedir. Yarı iletken anahtarın anlık olarak iletime girmesi sonucunda yarı iletken uç gerilimi yükselişini sürdüremez.

4.2 Uygulama devresi sonuçları

Önerilen TVS'li devrenin pratikte nasıl çalıştığını inceleyebilmek amacıyla bir uygulama devresi geliştirilmiştir. Altium Designer (Version 17.1.5) yardımıyla sch ve pcb çalışmaları yapılmış, sonrasında STM32F100R8 ARM tabanlı

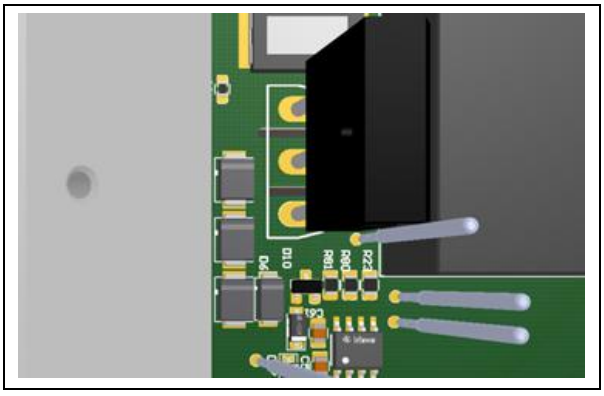
işlemci yardımıyla devrenin kontrolü gerçekleştirilmiştir. Köprü doğrultucu olarak GSIB2560, yarı iletken anahtar olarak IHW20N135R5, IGBT sürücüsü olarak 1EDI05I12AF entegresi kullanılmıştır. Öneriye konu olan TVS elemanı ise 400V luk P6SMB400 devre elemanı olarak seçilmiştir. 3 adet TVS seri bağlanarak 1200V_{DC}'lik bir V_{CE} gerilim üst limiti amaçlanmıştır.

Rezonans kondansatörü 270nF değerinde seçilmiş, kullanılan bobinin boştaki endüktans değeri 115µH olarak ölçülmüştür. Tencere olarak döküm tencere seçilmiş, tencereli durumda eşdeğer direnç ve eşdeğer endüktans değeri sırasıyla 4Ω ve 90µH olarak ölçülmüştür. Şekil 15'te uygulama devresinde kullanılan devre şeması, Şekil 16'da uygulama devresinde kullanılan devre bloğu ve Şekil 17'de ise uygulama amacıyla kullanılan test düzeneği gösterilmek Tektronix marka DPO5034B Dijital Osiloskop kullanılarak alınan ölçümlerde anahtar uç gerilimi V_{CE} belirli bir değerin üzerine çıktığında yarı iletken anahtarın iletime girdiği görülmektedir.



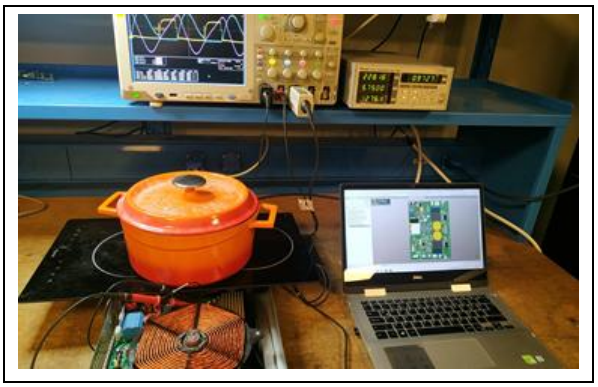
Şekil 15. Uygulama devresinde kullanılan devre şeması.

Figure 15. Circuit diagram used in the application circuit.



Şekil 16. Uygulama devresinde kullanılan devre bloğu.

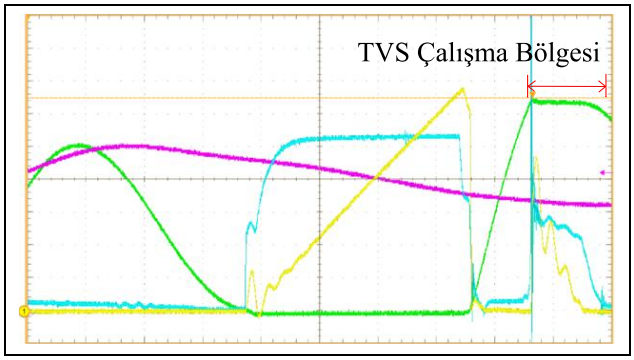
Figure 16. Circuit block used in the application circuit.



Şekil 17. Uygulama amacıyla kurulan test düzeneği.

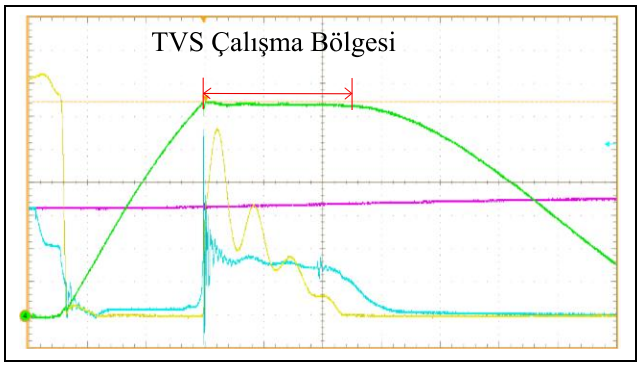
Figure 17. Test setup established for application purposes.

Şekil 18 ve Şekil 19 incelendiğinde, yeşil renk ile gösterilen V_{CE} gerilimi, 1200V_{DC} değerinin üzerine çıktığında TVS devre elemanları iletime girmekte ve bunun sonucu olarak sarı ile gösterilen yarı iletken anahtar akımı oluşmakta, bu sayede V_{CE} anahtar geriliminin belirli bir değerin üzerine çıkması engellenmektedir.



Şekil 18. Uygulama devresinden elde edilen detaylı dalga şekilleri. Yeşil sinyal: V_{CE} yarı iletken anahtar uç gerilimi (200V/div). Mavi sinyal: V_{GATE} anahtar sürme gerilimi (3V/div). Sarı sinyal: I_{GATE} anahtar sürme akımı (10A/div).

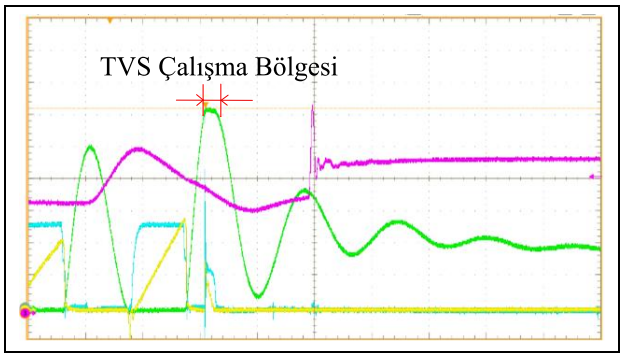
Figure 18. Detailed waveforms obtained from the application circuit. Green signal: V_{CE} semiconductor switch voltage (200V/div). Blue signal: V_{GATE} switch gate drive voltage (3V/div). Yellow signal: I_{GATE} switch gate drive current (10A/div).



Şekil 19. Uygulama devresinden elde edilen detaylı dalga şekilleri. Yeşil sinyal: V_{CE} yarı iletken anahtar uç gerilimi (200V/div). Mavi sinyal: V_{GATE} anahtar sürme gerilimi (5V/div). Sarı sinyal: I_{GATE} anahtar sürme akımı (10A/div).

Figure 19. Detailed waveforms obtained from the application circuit. Green signal: V_{CE} semiconductor switch voltage (200V/div). Blue signal: V_{GATE} switch gate drive voltage (5V/div). Yellow signal: I_{GATE} switch gate drive current (10A/div).

Şekil 20 incelendiğinde ise TVS devre elemanlarının iletime girmesinin hemen ardından sürme işaretlerinin kontrolcü ve sürücü tarafından kesildiği, bu sayede tekrarlı bir TVS çalışmasının önüne geçildiği görülmektedir. Bu sayede yarı iletken anahtarda oluşması muhtemel aşırı ısınmanın önüne geçilmiş olacaktır.



Şekil 20. Uygulama devresinden elde edilen detaylı dalga şekilleri. Yeşil sinyal: V_{CE} yarı iletken anahtar uç gerilimi (200V/div). Mavi sinyal: V_{GATE} anahtar sürme gerilimi (3V/div). Sarı sinyal: I_{GATE} anahtar sürme akımı (10A/div).

Figure 20. Detailed waveforms obtained from the application circuit. Green signal: V_{CE} semiconductor switch voltage (200V/div). Blue signal: V_{GATE} switch gate drive voltage (3V/div). Yellow signal: I_{GATE} switch gate drive current (10A/div).

5 Sonuçlar

Güç elektroniği devrelerindeki güvenli çalışma koşullarını zorlayan en önemli unsurlar, yarı iletken anahtarların maruz kalacağı yüksek gerilim ve yüksek akımlardır. Aşırı akımın ürettiği aşırı ısı, zorlamalı soğutma yöntemleriyle azaltılabilse bile, yüksek gerilimlere maruz kalan yarı iletken anahtarlar, muhtemelen kısa devre olacak ve devre çalışamaz hale gelecektir. Önerilen çalışmada yarı iletken anahtar uçlarında oluşması muhtemel yüksek gerilimler, kararlı hal ve geçici hal olmak üzere 2 ana kısımda incelenmiştir. Kararlı hal durumundaki yarı iletken gerilim kontrolüne ek olarak geçici hal durumlarında kısa süreli darbeleri sönümleyebilecek ilave bir devre tasarımına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla Geçici Gerilim Bastırıcılar (TVS) adı verilen ve zener diyot ile benzer bir çalışma ilkesine sahip yarı iletkenler kullanılmıştır. Kullanılan TVS devre elemanının değerine bağlı olarak V_{CE} gerilimi 1200V$_{DC}$ değerinin üzerine çıktığında yarı iletken anahtar I_{GATE} akımı ile iletime girmiş ve anahtar uç geriliminin yükselmesine izin verilmemiştir. Ayrıca geçici haldeki anlık gerilim yükselmesini engellemek için kullanılan TVS devresinin, kararlı halde iletime girmesi engellenerek yarı iletken anahtarda istenmeyen ve kontrolsüz akım ve gerilim işaretlerinin oluşması önlenmiştir. Başka bir deyişle geçici hal anahtar gerilim yükselmeleri TVS devresi ile sönümlenirken, kararlı hal anahtar gerilim yükselmeleri gerilim bölücü ve ADC'den oluşan kontrol bloğu tarafından kontrol edilmiştir.

6 Conclusions

The most important factors that challenge safe operating conditions in power electronic circuits are the high voltage and high currents that semiconductor switches will be exposed to. Although the excess heat produced by excessive current can be reduced by forced cooling methods, semiconductor switches exposed to high voltages will likely short circuit and render the circuit inoperable. In the proposed study, the high voltages that are likely to occur at semiconductor switch terminals are examined in two main parts: steady state and transient state. In addition to semiconductor voltage control in steady state, an additional circuit design that can absorb short-term pulses in transient states is needed. For this purpose, semiconductors called Transient Voltage Suppressors (TVS) that have a similar operating principle to the zener diode have been used. Depending on the value of the TVS circuit element used, when the V_{CE} voltage exceeded 1200V$_{DC}$, the semiconductor switch entered operation with the I_{GATE} current and the switch end voltage was not allowed to rise. In addition, the TVS circuit, which is used to prevent a temporary voltage increase, is prevented from operating in a steady state, thus preventing the formation of unwanted and uncontrolled current and voltage signals in the semiconductor switch. In other words, while transient state switch voltage spikes were damped by the TVS circuit, steady state switch voltage spikes were controlled by the control block consisting of voltage divider and ADC.

7 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Metin Öztürk fikrin oluşması, tasarımın yapılması, literatür taraması, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, kullanılan malzemelerin temin edilmesi, sonuçların incelenmesi, yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuştur.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur". "Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır".

9 Kaynaklar

[1] Lucía O, Maussion P, Dede E, Burdío JM. "Induction heating technology and its applications: past developments, current technology, and future challenges". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(05), 2509–2520, 2014.

[2] Kazimierczuk MK, Wang S. "Frequency-domain analysis of series resonant converter for continuous conduction mode". *IEEE Transactions on Power Electronics*, 7(2), 270–279, 1992.

[3] Ozturk M, Altintas N. "Multi-output AC–AC converter for domestic induction heating". *Electrical Engineering*, 105(1), 297–316, 2023.

[4] Tanaka T. "A new induction cooking range for heating any kind of metal vessels". *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 35(3), 635–641, 1989.

[5] Sarnago H, Lucia O, Mediano A, Burdio JM. "A class-e direct AC–AC converter with multicycle modulation for ınduction heating systems". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(5), 2521–2530, 2014.

[6] Vishnuram P, Ramachandiran G. "Capacitor-less induction heating system with self-resonant bifilar coil". *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 48(9), 1411–1425, 2020.

[7] Sarnago H, Lucia O, Mediano A, Burdio JM. "Direct AC-AC resonant boost converter for". *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(3), 1128–1139, 2014.

[8] Park HP, Kim M, Jung JH, Kim HS. "Load adaptive modulation method for all-metal induction heating application". *2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, San Antonio, TX, USA, 04-08 March 2018.

[9] Sarnago H, Lucia O, Burdio JM. "Multiple-output ZCS resonant inverter for multi-coil induction heating appliances". *2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Tampa, FL, USA, 26-30 March 2017.

[10] Çetin S, Sazak BS. "Mutfak tipi ısıtma uygulamaları için iki çıkışlı bir indüksiyon ısıtma inverteri tasarımı". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(3), 397–401, 2006.
[11] Huang MS, Liao CC, Li ZF, Shih ZR, Hsueh HW. "Quantitative design and ımplementation of an ınduction cooker for a copper pan". *IEEE Access*, 9, 5105–5118, 2021.
[12] Jeong SH, Jin JI, Park HP, Jung JH. "Enhanced load adaptive modulation of induction heating series resonant inverters to heat various-material vessels". *Journal of Power Electronics*, 22(6), 1020–1032, 2022.
[13] Jang E, Park SM, Joo D, Ahn HM, Lee BK. "Analysis and Comparison of Topological Configurations for All-Metal Induction Cookers". *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 14(6), 2399–2408, 2019.
[14] Han W, Chau KT, Liu W, Tian X, Wang H. "A dual-resonant topology-reconfigurable ınverter for all-metal induction heating". *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 10(4), 3818–3829, 2022.
[15] Sarnago H, Lucía Ó, Mediano A, Burdío JM. "Analytical model of the half-bridge series resonant ınverter for ımproved power conversion efficiency and performance". *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(8), 4128–4143, 2015.
[16] Hsieh HI, Kuo CC, Chang WT. "Study of half-bridge series-resonant induction cooker powered by line rectified DC with less filtering". *IET Power Electronics*, 16(11), 1929-1942 ,2023.
[17] Koertzen HW, Wyk JDV, Ferreira JA. "Design of the half-bridge, series resonant converter for induction cooking". *Proceedings of PESC '95-Power Electronics Specialist Conference*, Atlanta, GA, USA, 18-22 June 1995.
[18] Zungor F, Bodur H, Ozturk M, Obdan H. "Design Methodology of Series Resonant Half Bridge Inverter for Induction Cooker". *IEEE Access*, 11, 135476–135492, 2023.
[19] Koroglu S, Sazak BS."Mutfak Uygulamaları İçin yarım köprü seri rezonans invertörlü indüksiyon ısıtma sistemi tasarımı". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(2), 167–172, 2002.
[20] Ozturk M. "A simplified design method for quasi-resonant ınverter used in ınduction hob". *Electronics*, 12(19), 4145, 2023.
[21] Sheikhian I, Kaminski N, Voß S, Scholz W, Herweg E. "Optimisation of quasi-resonant ınduction cookers". *15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, Lille, France, 02-06 September 2013.
[22] Ozturk M, Zungor F, Emre B, Oz B. "quasi resonant ınverter load recognition method". *IEEE Access*, 10, 89376–89386, 2022.
[23] Villa J, Navarro D, Dominguez A, Artigas JI, Barragan LA. "Vessel recognition in ınduction heating appliances - a deep-learning approach". *IEEE Access*, 9, 16053–16061, 2021.
[24] Li ZF, Hu JC, Huang MS, Lin YL, Lin CW, Meng YM. "Load estimation for ınduction heating cookers based on series RLC natural resonant current". *Energies*, 15(4), 1294, 2022.
[25] Spateri E, Ruiz F, Gruosso G. "Modelling and simulation of quasi-resonant ınverter for ınduction heating under variable load". *Electronics*, 12(3), 753, 2023.
[26] Acero J, Burdío JM, Barragán LA, Alonso R. "A model of the equivalent impedance of the coupled winding-load system for a domestic induction heating application". *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Vigo, Spain, 04-07 June 2007.
[27] Okuno H, Yonemori H, Kobayashi M. "Relation of gap length and resonant frequency about a double-coil drive type IH cooker". *15th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, Saint Julian's, Malta, 31 August-03 September 2008.
[28] Jovančić N, Hadžimejlić N, Ćeklić P. "Efficient control of IGBT transistor as part of overvoltage protection". *International Journal of Electrical Engineering and Computing*, 1(1), 46-52, 2017.
[29] Chen M, Xiong Z, Zhang Y, Zhu E, Zhao Y, Ma Z. "IGBT Overvoltage protection based on dynamic voltage feedback and active clamping". *Applied Sciences*, 13(2), 795, 2023.
[30] Du L, Ma C, Zhang Y, Chen Y, Luo Y. "A new IGBT over-voltage and over-current protection method based on active clamp technology". *22nd International Vacuum Electronics Conference,* Rotterdam, Netherlands, 27-30 April 2021.
[31] Omori H, Yamashita H, Nakaoka M, Maruhashi T. "A novel type induction-heating single-ended resonant inverter using new bipolar Darlington-Transistor". *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Toulouse, France, 24-28 June 1985.
[32] Komatsu WPW. "A simple and reliable class E inverter for induction heating applications". *International Journal of Electronics*, 84(2), 157–165, 1998.
[33] Terai H, Hirota I, Miyauchi T, Omori H, Ogura K, Hirota Y. "Comparative performance evaluations of IGBTs and MCT in single-ended quasi-resonant zero voltage soft switching inverter". *IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference*, Vancouver, BC, Canada, 17-21 June 2001.
[34] Sazak BS. "Design of a 500W resonant inductıon heater". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(1), 871–878, 1999.
[35] Alexander CK, Sadiku MNO. *Fundamentals of Electric Circuits*. 6th ed. New York, USA, McGraw-Hill Education, 2017.

Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 31(7), 1235-1238, 2025

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Desing of class AB EDDCC+ with the feature of electronic tunability

Elektronik ayarlanabilir AB sınıfı EDDCC+ tasarımı

Tayfun Unuk[1*], *Tolga Yucehan*[2]

[1]Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Pamukkale University, Denizli, Türkiye.
tunuk@pau.edu.tr

[2]Dazkiri Department of Electrical and Energy, Vocational School, Afyon Kocatepe University, Afyonkarahisar, Türkiye.
tyucehan@aku.edu.tr

Received/Geliş Tarihi: 30.01.2025 Revision/Düzeltme Tarihi: 15.03.2025 doi: 10.5505/pajes.2025.22823
Accepted/Kabul Tarihi: 11.04.2025 Research Article/Araştırma Makalesi

Abstract

In this paper, a novel BJT-based class AB electronically tunable plus-type differential difference current conveyor (EDDCC+) is proposed, in which a translinear circuit principle is utilized. The current gain of the proposed EDDCC+ can be easily adjusted externally. Electronically tunability is provided by current sources in the translinear loop. The proposed EDDCC+ is simulated through the SPICE program to indicate the functionality of the proposed EDDCC+, where a previously published KHN filter is used as an application example. AT&T CBIC-R (N-2X and P-2X) transistor model parameters are used in the simulation of this circuit. Simulation results of the KHN filter verify theoretical calculations. The cut-off frequency of the low-pass, high-pass, and band-pass filters in the KHN filter circuit has been electronically changed.

Keywords: Translinear principle, EDDCC+, Electronically tunable, BJT, KHN filter.

Öz

Bu makalede, translineer devre prensibinin kullanıldığı yeni bir BJT tabanlı AB sınıfı elektronik olarak ayarlanabilen pozitif tip diferansiyel fark akım taşıyıcı (EDDCC+) önerilmektedir. Önerilen EDDCC+'nın mevcut akım kazancı elektronik olarak ayarlanabilmektedir. Elektronik olarak ayarlama işlemi translineer çevrimde bulunan akım kaynakları ile sağlanmaktadır. EDDCC+'nın işlevselliğini göstermek için daha önce yayınlanmış bir KHN filtresinin uygulama örneği olarak kullanılmıştır. Benzetimler SPICE programı aracılığıyla yapılmıştır. AT&T CBIC-R (N-2X ve P-2X) transistör modeli parametreler önerilen BJT tabanlı EDDCC+'nın benzetiminde kullanılmıştır. Teorik hesaplamalar, KHN süzgecinin benzetim sonuçları ile doğrulanmıştır. Elektronik olarak KHN süzgeç devresinde bulunan alçak geçiren, yüksek geçiren ve bant geçiren süzgeçlerin kesim frekansı değiştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Translineer prensip, EDDCC+, Elektronik ayarlanabilirlik, BJT, KHN süzgeç.

1 Introduction

Active building blocks (ABBs) are widely utilized in many analog electronic circuits, such as oscillators, filters, capacitance multipliers, inductor simulators, etc., due to their low power consumption and adjustable properties. The most popular ABBs are current feedback operational amplifiers (CFOAs) [1], operational transconductance amplifiers (OTAs) [2], and current conveyors (CCs) [3]. Many different CCs have emerged from the first designed CCs until today. In this study, differential difference current conveyors (DDCCs) [4] are emphasized due to their input and output relationships.

The controllability of the active elements provides the flexibility of the user and the multiple tasks of the circuit. The translinear principle was introduced by Gilbert in 1975 by making use of the current and voltage relations of the semiconductor elements [5]. According to this principle, forward-biased p-n junctions should form a closed loop, and the number of junctions clockwise should be equal to the number of junctions counterclockwise. In the literature, there are many circuits designed using translinear principles, such as RMS-DC convertors [6], sinusoidal frequency divider circuits [7], logarithmic domain filters [8], [9], and RF RMS detectors [10]. In literature, many circuits with adjustable current gain(s) [11]-[16] have been reported. Nevertheless, effective control ranges of the current gain(s) in [11]-[16] are quite narrow.

In this study, a novel ABB called as an electronically tunable plus-type differential difference current conveyor (EDDCC+) with higher effective control ranges compared to other ABBs [11]-[16] is proposed. The proposed EDDCC+ can be adjusted externally by changing its current gain. The proposed EDDCC+ is simulated via the SPICE program to demonstrate the validity of the proposed EDDCC+ in which a previously published KHN filter [11] is used as an application example.

This paper is organized as follows: the internal structure, terminal equations of the EDDCC+, the current splitter, and current multiplier blocks used in the EDDCC+ are introduced in section 2. In Section 3, a KHN filter that was published in the literature before is treated. Finally, some simulation results and information about targeted future studies are given in Section 4 and Section 5, respectively.

2 Proposed EDDCC+

The equivalent ideal model of the EDDCC+ is shown in Figure 1. It has three resistors and two dependent sources. The values of all three resistors, R_{Y1}, R_{Y2}, and R_{Y3}, are ideally infinity. The relations among the terminals of the EDDCC+ can be defined in Equation (1). The reason for choosing the EDDCC+ is mainly its high mathematical capability, as shown in Equation (1).

*Corresponding author/Yazışılan Yazar

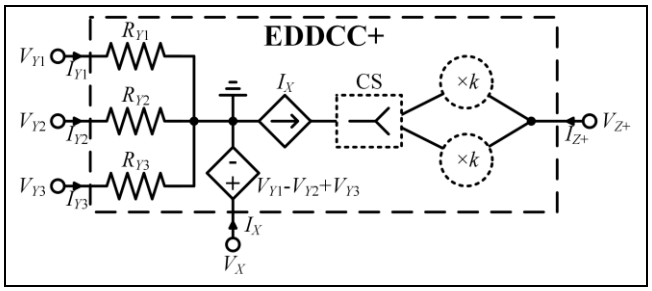


Figure 1. The equivalent model of ideal EDDCC+.

$$\begin{bmatrix} I_{Y1} \\ I_{Y2} \\ I_{Y3} \\ I_{Z+} \\ V_X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k \\ 1 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Y1} \\ V_{Y2} \\ V_{Y3} \\ I_X \end{bmatrix} \quad (1)$$

In the matrix equation demonstrated above, k is an electronically adjustable current gain. The proposed EDDCC+ has three main parts, as illustrated in Figure 2. The first part consists of BJT-based DDCC [15]. The second part is the current splitter (CS) [17], which is an indispensable element of differential class AB circuits. The last part is the one quad current multiplier (OQM) designed using a translinear principle [18],[19].

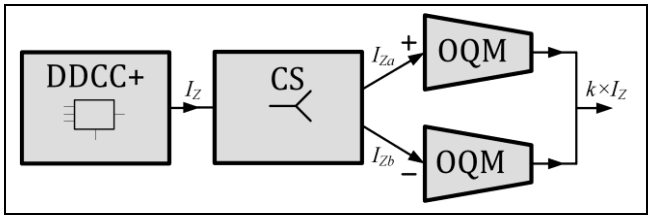


Figure 2. Block of proposed EDDCC+.

CS separates the current, I_Z, into currents, I_{Za} and I_{Zb}; thus, the values of I_{Za} and I_{Zb} are always positive. Thanks to the current splitter, scalar multiplication can be easily realized with single-area multiplication circuits of two positive currents. The relationship among the currents, I_Z, I_{Za}, and I_{Zb} is given below.

$$I_Z = I_{Za} - I_{Zb} \quad (2)$$

The proposed BJT-based internal structure of the EDDCC+ is depicted in Figure 3. The proposed EDDCC+ is a modified version of the commonly used DDCC [4].

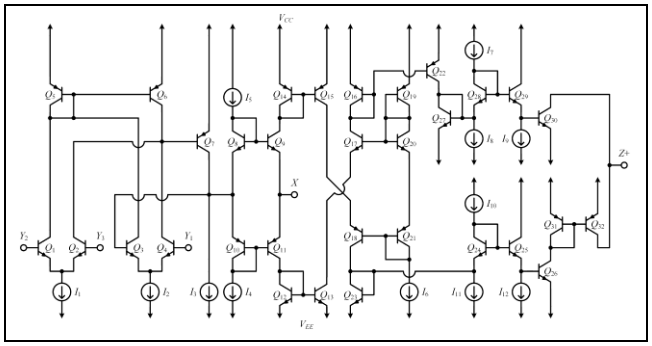


Figure 3. Proposed class AB BJT-based EDDCC+.

On the other hand, the parameters k_1 and k_2 are electronically tunable current multiplier factors. The k parameters can be selected as maximum 3 and minimum 0.05.The values of the k_1 and k_2 are respectively computed as follows:

$$k_1 = \frac{I_7}{I_9} = \frac{I_8}{I_9} \quad 3(a)$$

$$k_2 = \frac{I_{10}}{I_{12}} = \frac{I_{11}}{I_{12}} \quad 3(b)$$

3 KHN filter using the proposed EDDCC+

KHN filters are one of the well-known circuit types in literature. KHN filters [11] stand out due to their low element properties, low sensitivity, good stability, etc.

If the KHN filter given in Figure 4 is mathematically analyzed, the following high-pass (HP), band-pass (BP), and low-pass (LP) transfer functions are respectively obtained:

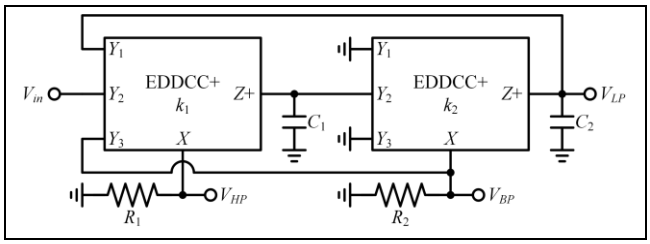


Figure 4. A KHN filter, which is previously published in [10].

$$\frac{V_{HP}}{V_{in}} = \frac{s^2}{s^2 + s\frac{k_1}{R_1C_1} + \frac{k_1k_2}{R_1R_2C_1C_2}} \quad 4(a)$$

$$\frac{V_{BP}}{V_{in}} = \frac{s\frac{k_1}{R_1C_1}}{s^2 + s\frac{k_1}{R_1C_1} + \frac{k_1k_2}{R_1R_2C_1C_2}} \quad 4(b)$$

$$\frac{V_{LP}}{V_{in}} = \frac{\frac{k_1k_2}{R_1R_2C_1C_2}}{s^2 + s\frac{k_1}{R_1C_1} + \frac{k_1k_2}{R_1R_2C_1C_2}} \quad 4(c)$$

The natural frequency and quality factor of the KHN filter given in Figure 4 are respectively shown in Equations (5). As shown in Equations (5), the natural frequency can be electronically adjusted with the parameters k_1 and k_2, without changing the values of the passive elements.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k_1k_2}{R_1R_2C_1C_2}} \quad 5(a)$$

$$Q = \sqrt{\frac{k_2R_1C_1}{k_1R_2C_2}} \quad 5(b)$$

4 Simulation results of EDDCC+ and KHN filter circuit

The KHN filter is simulated through the SPICE program in which the proposed EDDCC+ structure in Figure 3 is included. The circuit parameters are chosen as follows: $k_1 = k_2 = k$, $V_{CC} = -V_{EE} = 2.5\,V, R_1 = R_2 = 1\,k\Omega, C_1 = C_2 = 100\,pF, I_1 =$

$I_2 = 50\ \mu A, I_3 = 100\ \mu A, I_4 = I_5 = 300\ \mu A, I_6 = 7\ \mu A, I_9 = I_{12} = 40\ \mu A$ and $I_7 = I_8 = I_{10} = I_{11} = k \times 40\ \mu A$ where AT&T CBIC-R (N-2X and P-2X) BJT parameters given in [18] are utilized. As a result of selecting these values, and BJT paramters, simulation results of the variations of the differantial voltage gain of the EDDCC+ versus frequency is given in Figure 5, while the variations of the current gain versus frequency is indicated in Figure 6.

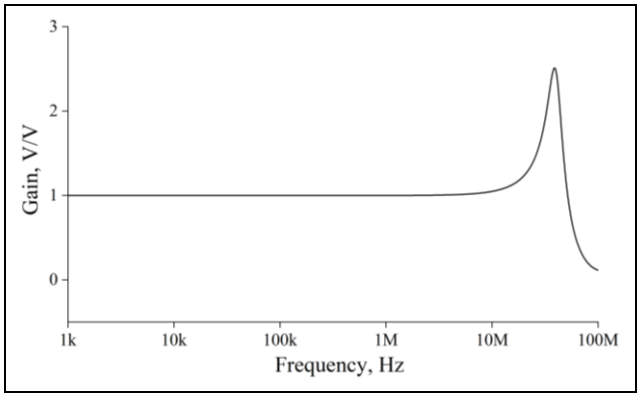


Figure 5. The voltage transfer performance of the EDDCC+ versus frequency.

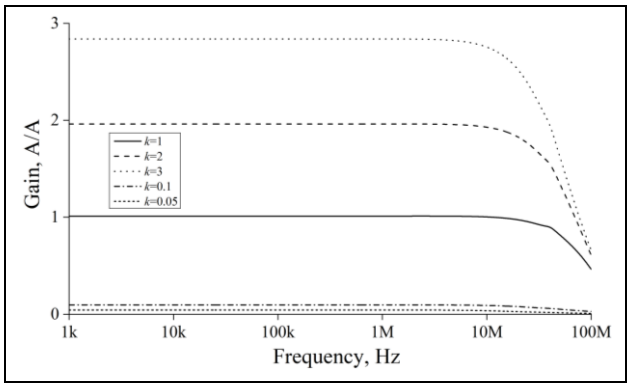


Figure 6. The current transfer with the current gain of the EDDCC+ versus frequency.

For $k = 1$, an AC analysis for the KHN filter demonstrated in Figure 7 is carried out. One observes from Figure 7 that the natural frequency of the KHN filter in Figure 4 is about 1.45 MHz (about 1.59 MHz theoretically) for $k = 1$. If $k = 0.1$ is chosen by selecting $I_7 = I_8 = I_{10} = I_{11} = 4\ \mu A$, and $I_9 = I_{12} = 40\ \mu A$, the natural frequency of the KHN filter is approximately 145 kHz (about 159 kHz theoretically), which is shown in Figure 8.

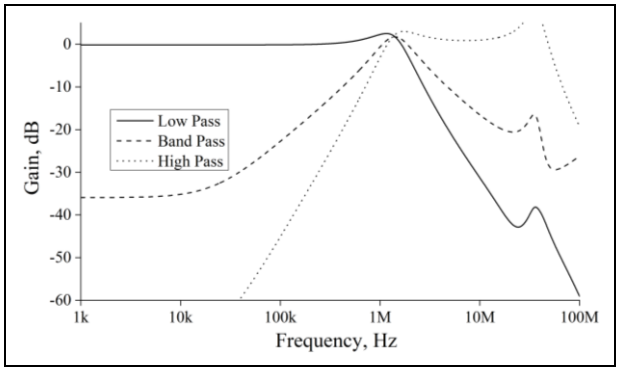


Figure 7. Frequency domain simulation of KHN filter for $k = 1$.

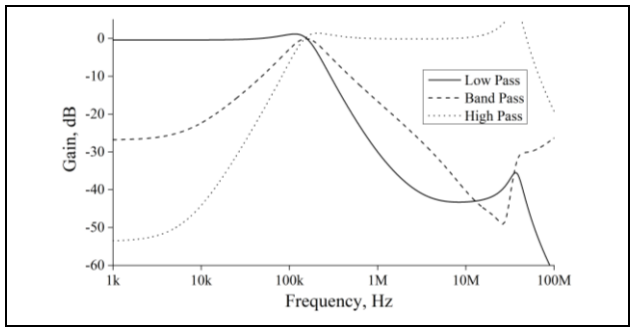


Figure 8. Frequency domain simulation of KHN filter for $k = 0.1$.

Similarly, if $k = 0.05$ is chosen by chosing $I_7 = I_8 = I_{10} = I_{11} = 2\ \mu A$, and $I_9 = I_{12} = 40\ \mu A$ the natural frequency is approximately found as 73 kHz (about 80 kHz theoretically), which is depicted in Figure 9. In Figures 7-9, the simulation results for the HP, BP, and LP outputs of the KHN filter are shown results. The frequency response for different k values of the low-pass filter output of the KHN filter is shown in Figure 10.

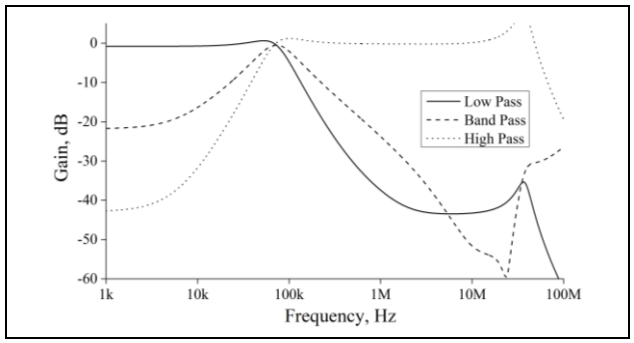


Figure 9. Frequency domain simulation of KHN filter for $k = 0.05$.

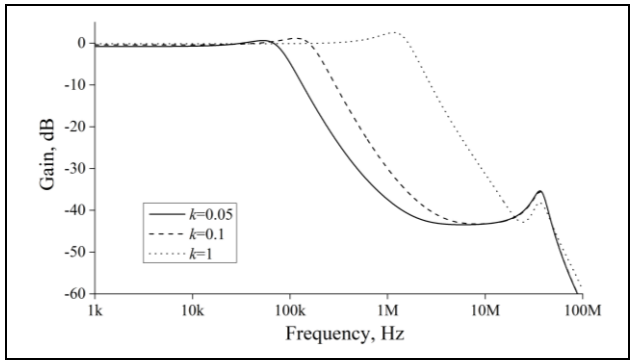


Figure 10. Frequency domain simulation of low-pass filter for different k values.

The comparison of various features of the proposed circuit with similar design in the literature is given in Table 1.

Table 1. Comparison table.

Reference	Number of Transistors	Type of Transistos	Class AB	Multiplier Range
[11]	16	BiCMOS	N.A.	x1-x2
[12]	20	BiCMOS	N.A.	x1-x5
[13]	36	BJT	No	x1-x15
[14]	29	MOS	N.A.	x1-x10
[15]	36	BJT	N.A.	x1-x20
This work	32	BJT	Yes	X0.05-x3

NA: Not available.

5 Conclusions

In this paper, a novel EDDCC+ is proposed. This novel EDDCC+ is obtained by using CS and OQM connected to the DDCC output; thus, electronically tunable class AB EDDCC+ is achieved. The simulation results of the proposed EDDCC+ show that the proposed EDDCC+ can work up to 1 MHz frequency. To show the workability of the proposed EDDCC+, the previously published KHN filter is simulated via the SPICE program in which the proposed EDDCC+ is used. As can be seen from the simulation results of the KHN filter, the proposed EDDCC+ can also work for different *k* values. Different kinds of circuits, such as tunable oscillators, inductor simulators, etc. can be designed by using the proposed EDDCC+. Future studies aim to improve the performance of EDDCC+ proposed in this paper in various aspects by designing an internal structure with a higher multiplier and working on a different type of transistor-based internal structure. Similarly, it is aimed to design a new analog circuit, such as an analog filter circuit, capacitance multiplier circuit, and inductance simulator circuit that will work in a compatible way with future studies.

6 Author contribution statements

Tayfun Unuk in the formation of the idea, the design, simulations and the literature review; Tolga Yucehan in the assessment of obtained simulations, results spelling and checking results.

7 Ethics committee approval and conflict of interest statement

“There is no need to obtain permission from the ethics committee”. “There is no conflict of interest with any person/institution”.

8 References

[1] Alpaslan M, Yuce E. “Inverting CFOA based lossless and lossy grounded inductor simulators”. *Circuits, Systems, and Signal Processing.*, 34(10), 3081-3100, 2015.

[2] Chen J, Sanchez-Sinencio E, Silva-Martinez J. “Frequency-dependent harmonic-distortion analysis of a linearized cross-coupled CMOS OTA and its application to OTA-C filters”. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers,* 53(3), 499-510, 2006.

[3] Kacar F, Kuntman H, Kuntman A. “Grounded inductance simulator topologies realization with single current differencing current conveyor”. *2015 European Conference on Circuit Theory and Design*, Trondheim, Norway, 24–26 August 2015.

[4] Chiu W, L.u SI, Tsao H-W, Chen JJ, “CMOS differential difference current conveyors and their applications”. *IEE Proceedings-Circuits, Devices and Systems.*, 143(2), 91-93, 1996.

[5] Gilbert B. “Translinear circuits: a proposed classification”. *Electronics Letters,* 11(1), 14-25, 1975.

[6] Mulder J, Van A, der Woerd, Serdijn W, Van Roermund A. "An RMS-DC converter based on the dynamic translinear principle". *IEEE Journal. of Solid-State Circuits*, 32(7), 1146-1150, 1997.

[7] Abuelma'atti MT. "A Translinear circuit for sinusoidal frequency division". *IEEE transactions on instrumentation and measurement,* 54(1), 10-14, 2005.

[8] Punzenberger M, Enz C. "Log-domain filters for low-voltage low-power applications". *IEEE International Conference on Electronics Circuits and Systems. Surfing the Waves of Science and Technology*, Lisboa, Portugal, 7-9 September 1998.

[9] Arslanalp R, Tola A T, " ELIN filtrelerin genel sentez teorisi ve gerçeklenme şartlari". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi,* 13(1), 47-56, 2011.

[10] Yin Q, Eisenstadt W R, Fox R M, Zhang T. "A translinear RMS detector for the embedded test of RF ICs". *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 54(5), 1708-1714, 2005

[11] Yamacli S, Ozcan S, Kuntman H. “A novel active circuit building block: electronically tunable differential difference current conveyor (EDDCC) and its application to KHN filter design”. *2006 International Conference on Applied Electronics*, Pilsen, Czech Republic, 6-7 September 2006.

[12] Yamacli S, Ozcan S, Kuntman H. "Yeni bir aktif eleman: diferansiyel gerilim alan elektronik olarak ayarlanabilir akım taşıyıcı (EDVCC)". *ELECO 2004 Elektrik, Elektronik, Bilgisayar Muhendisliği Sempozyumu*, Bursa, Türkiye, 8-12 Aralık 2004.

[13] Unuk T, Arslanalp R. "Design of BJT based electronically tunable differential difference current conveyor and its application". *26th International Conference Radioelektronika*, Kosice, Slovakia 19–20 April 2016.

[14] Somdunyakanok M, Angkeaw K, Prommee P, “Floating-capacitance multiplier based on CCDDCCs and its application”. *2011 IEEE Region 10 Conference*, Bali Indonesia 21-24 November 2011.

[15] Torteanchai U, Kumngern M, Dejhan K. “Current-controlled CCDDCC with controlled current gain”. *2011 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering,* Shanghai, China 10-12 June 2011.

[16] Unuk T, Arslanalp R, Tez S. “Design of Current-Mode versatile Multi-Input analog multiplier topology”. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 160, 1-10, 2023.

[17] Van Dijk L P L, van der Woerd A C, Mulder J, van Roermund A H M. “An ultra-low-power, low-voltage electronic audio delay line for use in hearing aids”. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 33(2), 291-294, 1998.

[18] Duduk N, Tola A T. "Second order Class A log domain all-pass filter design employing lossy integrators". *26th International Conference Radioelektronika*, Kosice, Slovakia 19–20 April 2016.

[19] Frey D R. “Log-domain filtering: an approach to current-mode filtering”. *IEE Proceedings G (Circuits, Devices and Systems)*, 140(6), 406-416, 1993.

Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 31(7), 1239-1244, 2025

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Yavaş dalgalı mikroşerit yapılarla iki ve dört yollu Wilkinson güç bölücü tasarımı

Two-and four-way Wilkinson power divider design with slow-wave microstrip structures

Mehmet Çakır[1*], *Ceyhun Karpuz*[2]

[1]Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Bayburt Üniversitesi, Bayburt, Türkiye.
mcakir@bayburt.edu.tr

[2]Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye
ckarpuz@pau.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 03.06.2024 Düzeltme Tarihi/Revision: 16.10.2024 doi: 10.5505/pajes.2025.24615
Kabul Tarihi/Accepted: 08.03.2025 Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, geleneksel Wilkinson güç bölücüsü iletim hatları menderes yapılar ile modifiye edilerek, ardışık olarak iki ve üç kez bağlanmış iki yollu ve iki kez ardışık bağlanmış dört yollu mikroşerit güç bölücü devreleri sunulmaktadır. Tasarımlarda bağıl dielektrik sabiti 10.2 ve yüksekliği 1.27 mm olan RT/Duroid alt tabaka kullanılmış; elektromanyetik simülasyon programı ile frekans cevapları optimize edilmiştir. Güç bölücülerde her bir bağlantı noktasına 100 ohm direnç yerleştirilmiş ve bu sayede izolasyon ile bant genişliğinin artırılması sağlanmıştır. İki kez ardışık bağlanmış iki yollu yapıda 0.17-1.36 GHz bandında ortalama geri dönüş kaybı-14.45 dB, iletim kaybı-3.40 dB ve izolasyon değeri -13.25 dB olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, 2.24-2.97 GHz frekans bandında geri dönüş kaybı -15.45 dB, iletim kaybı -3.50 dB ve izolasyon değeri -15.93 dB olarak ölçülmüştür. Üç kez ardışık bağlanmış yapıda ise 0.11-1.05 GHz arasında ortalama geri dönüş kaybı-14.73 dB, iletim kaybı -3.38 dB ve izolasyon değeri -12.20 dB; 1.36-2.10 GHz arasında ortalama geri dönüş kaybı -15.21 dB, iletim kaybı -3.54 dB ve izolasyon değeri -15.34 dB; 2.59-3.14 GHz arasında ise ortalama geri dönüş kaybı -17.52 dB, iletim kaybı -3.65 dB ve izolasyon değeri -14.03 dB olarak ölçülmüştür. Dört yollu, iki kez ardışık bağlanmış yapıda ise 0.47-1.17 GHz aralığında ortalama geri dönüş kaybı -20.65 dB, iletim kaybı -6.17 dB ve izolasyon değeri -16.74 dB olarak ölçülmüştür. Tasarlanan devreler imal edilmiş ve simülasyon sonuçlarının ölçüm sonuçlarıyla uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Wilkinson güç bölücü, Kaskat bağlı, İki yollu güç bölücü, Dört yollu güç bölücü, Menderes yapı.

Abstract

In this study, conventional Wilkinson power dividers have been modified with meandered transmission line structures, resulting in two-port power dividers with either two or three serial connections and four-port power dividers with two serial connections. A substrate with a relative permittivity of 10.2 and a height of 1.27 mm, RT/Duroid, was used for the designs, and frequency responses were optimized using an electromagnetic simulation program. To enhance isolation and bandwidth, 100-ohm resistors were placed at each connection point in the power dividers. In the two-port configuration with two serial connections, the average return loss was -14.45 dB, insertion loss was -3.40 dB, and isolation was -13.25 dB over the 0.17-1.36 GHz band. Additionally, in the 2.24-2.97 GHz frequency band, the return loss was -15.45 dB, insertion loss was -3.50 dB, and isolation was -15.93 dB. In the three-port configuration with three serial connections, the average return loss was -14.73 dB, insertion loss was -3.38 dB, and isolation was -12.20 dB over the 0.11-1.05 GHz range; -15.21 dB return loss, -3.54 dB insertion loss, and -15.34 dB isolation over the 1.36-2.10 GHz range; and -17.52 dB return loss, -3.65 dB insertion loss, and -14.03 dB isolation over the 2.59-3.14 GHz range. In the four-port configuration with two serial connections, the average return loss was -20.65 dB, insertion loss was -6.17 dB, and isolation was -16.74 dB in the 0.47-1.17 GHz range. The designed circuits were fabricated, and it was observed that the simulation results were consistent with the measurement results.

Keywords: Wilkinson power divider, Cascade connected power divider, Two-way power divider, Meandered structure.

1 Giriş

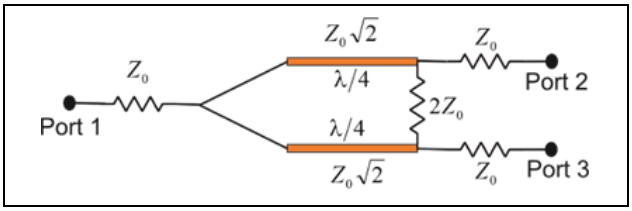
Mikrodalga güç bölücü devreleri, giriş sinyalini eşit genlikte ve aynı fazda birden fazla çıkışa bölen yapılarıyla anten dizileri başta olmak üzere birçok RF/mikrodalga haberleşme sisteminde kullanım alanı bulmaktadır [1]. 1960 yılında J. Wilkinson tarafından literatüre sunulan Wilkinson güç bölücü, giriş sinyalinin eşit faz ve genlikteki sinyallere yüksek izolasyonla ayrılmasını sağlamıştır [2]. Geleneksel Wilkinson güç bölücü, giriş portundan uygulanan gücü kayıpsız olarak iki çıkış porta eşit bölecek şekilde tasarlanmıştır. Wilkinson güç bölücüler kolay imalatı, kayıplarının az olması, maliyetinin düşük olması, çıkış portları arasında yüksek izolasyonun olması gibi nedenlerden dolayı en yaygın kullanılan güç bölücülerdir. Wilkinson güç bölücü, $Z_0\sqrt{2}\,\Omega$ empedansına sahip iki iletim hattı ve çıkış portları arasında izolasyon sağlayan bir $2Z_0\Omega$ değerindeki dirençten oluşur [2],[3]. Geleneksel Wilkinson güç bölücünün çeyrek dalga boyu ($\lambda/4$) uzunluğundaki iletim hatları modifiye edilerek çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Trapez, dairesel ve dikdörtgen rezonatörlerin kombinasyonu kullanılarak [4], yarım daire rezonatör ve iki T-şekilli rezonatör kullanılarak [5], modifiye edilmiş bir alçak geçiren filtre kullanılarak [6], n yollu bir güç bölücü için n adet çok modlu rezonatör ve n adet dirençten oluşan modifiye bir yapı ile [7] Wilkinson güç bölücünün iletim hatları modifiye edilerek harmonik bastırma özellikli yeni güç bölücü tasarımları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, özel olarak tasarlanmış çift bantlı bir bant geçiren filtre içeren yapılar [8], yavaş dalgalı yapılar [9], özel tasarlanmış interdijital yapılar [10] kullanılarak filtreleme yapan güç bölücü tasarımları gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında, kapasitif yüklü yapı [11], T şeklinde rezonatör ve dört adet dikdörtgen şekilli rezonatör [12], çift iletim hattı tekniği [13], özel olarak tasarlanmış yapay iletim hattı modeli (bu model şönt kapasitör ve açık uçlu yan hatlardan

*Yazışılan yazar/Corresponding author

oluşmaktadır) [14], üçgen rezonatörler [15], indüktif yarık yüklemeli yapı ile iletim hattının empedans değerini değiştirerek yavaş dalgalı yapı [16] ve menderes yapılı iletim hattı [17] kullanarak boyut küçültme üzerine çalışmalar yapılmıştır. İletim hatları farklı güç oranlarına bölmek için çeşitli empedans değerlerine göre tasarlanmış iki kaskat bağlı yapılar [18], dairesel iletim hatları ve kaskat bağlantı kullanarak polarizasyon tespiti [19] üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada, geleneksel Wilkinson bölücünün iletim hatları menderes yapılı şekilde modifiye edilerek hem boyut küçültme sağlanmış hem de iki yollu olarak iki ve üç segmentli yapılar ile dört yollu olarak iki segmentli bir yapı tasarlanmıştır. İki yollu yapıların iki ve üç segmentli versiyonları, dört yollu yapının ise iki segmentli versiyonu geliştirilmiştir. Bu tasarımların amacı, bant sayısını artırarak dizi antenler için mikrodalga devre elemanları tasarlamaktır.

2 Materyal-metot

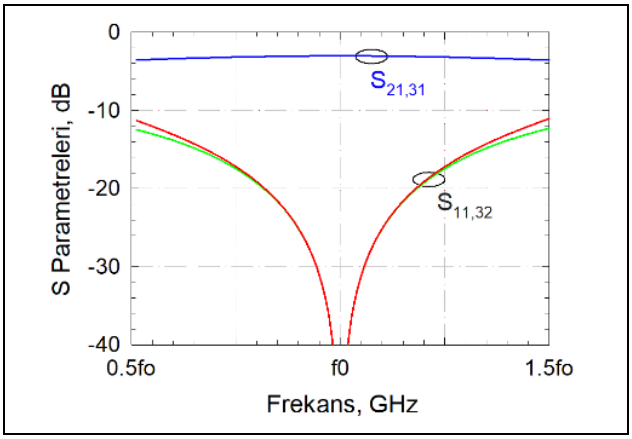
Bu çalışmada, geleneksel Wilkinson Güç Bölücü devresinin iletim hatları menderes yapılı şekilde modifiye edilerek güç bölücüler oluşturulmuştur. Bu güç bölücüler, ardışık olarak iki ve üç kez kaskat bağlanarak iki yollu ve iki kez kaskat bağlanarak dört yollu güç bölücüler tasarlanmıştır. Şekil 1'de geleneksel Wilkinson Güç Bölücü devresi gösterilmiştir.



Şekil 1. Geleneksel Wilkinson Güç Bölücü devre modeli.

Figure 1. Conventional Wilkinson power divider circuit model.

Şekil 2'de ise geleneksel Wilkinson Güç Bölücü'nün frekans cevabı verilmiştir.



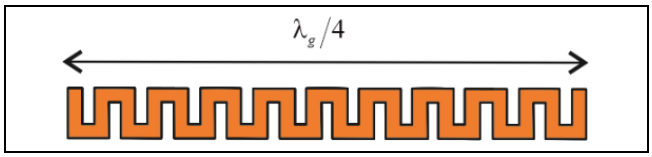
Şekil 2. Geleneksel Wilkinson güç bölücü devre modeli.

Figure 2. Frequency response of conventional Wilkinson Power Divider circuit model.

Burada, f_0 kesim frekansıdır. İdeal Wilkinson Güç Bölücü devresi için, S matrisi, gücün birinci porta girdiğinde eşit genlik ve aynı fazda çıkış portlarına bölündüğünü gösterir. Tüm portlar uyumlu yükle sonlandırıldığında, portlarda geri dönüş kayıpları sıfırdır. Çıkış portlarından birine bir sinyal uygulandığında, bu sinyalin sadece yarısı giriş portuna ulaşır; yüksek izolasyon nedeniyle diğer çıkış portunda ise herhangi bir sinyal görülmez. Wilkinson güç bölücünün ideal saçılma matrisi, Denklem 1'de gösterildiği gibidir.

$$S = \frac{-j}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Yavaş dalgalı yapılar kullanılarak devre boyutlarında küçültme sağlanmıştır [17]. Devre boyutunu küçültmek için çeyrek dalga boyu iletim hatları kapasitif veya indüktif olarak yüklenebilir. İletim hattının kapasitans veya indüktansındaki artışa bağlı olarak faz ve grup hızı azalır; bu nedenle bu yapılar yavaş dalga yapıları olarak adlandırılır. 50 Ω empedansına sahip iletim hattına menderes yapı verilerek, 0.8 mm derinliğinde ve 0.2 mm genişliğinde yarıklar açılarak, iletim hattının empedansı 70 Ω olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu devre tasarımında kullanılan menderes yapılı iletim hattı Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Menderes yapılı iletim hat modeli.

Figure 3. Meandered transmission line model.

Mikroşerit hatların karakteristik empedansı denklem 2 ile verilmiştir.

$$Z_0 = \frac{\eta_0}{2\pi\sqrt{\varepsilon_{eff}}} ln\left(\frac{8h}{W} + 025\frac{W}{2h}\right) \quad (2)$$

Burada, W mikroşerit hattın genişliği, h dielektrik tabakanın yüksekliği, η_0 serbest uzayın empedansı (120 π) ve ε_{eff} ise etkin dielektrik sabitidir. Kılavuz dalga boyu denklem 3 ile verilmiştir.

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \quad (3)$$

Her bir iletim hattının uzunluğu $\lambda_g/4$'tür. Menderes yapılı iletim hatları, kolay üretim süreci nedeniyle farklı mikrodalga devreleri için yaygın olarak tercih edilmektedir.

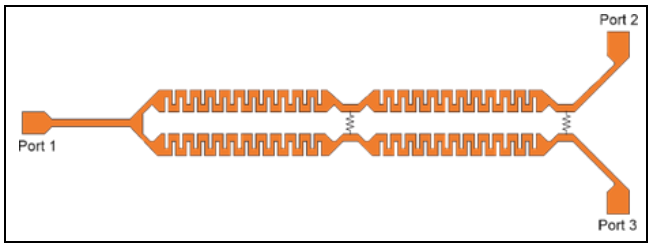
2.1 Kaskat bağlı iki yollu Wilkinson güç bölücü

Bu bölümde, anten dizilerinde yaygın olarak kullanılabilecek türde iki yollu Wilkinson Güç Bölücüler üzerinde yeni bir model sunulmaktadır. İki adet ve üç adet iki yollu Wilkinson Güç Bölücünün iletim hatlarının kaskat bağlanması sonucunda çoklu bant yapıları elde edilmiştir. Ayrıca, iletim hatlarının menderes yapılı olarak tasarlanmasıyla devre boyutları küçültülmüş ve daha kompakt bir hale getirilmiştir. Tasarımlarda bağıl dielektrik sabiti 10.2 ve kalınlığı 1.27 mm olan RT/Duroid taban malzemesi kullanılmıştır. Simülasyonlar, Tam Dalga Elektromanyetik Simülatör programı olan Sonnet kullanılarak yapılmıştır.

2.1.1 İki kez ardışık bağlı iki yollu Wilkinson güç bölücü

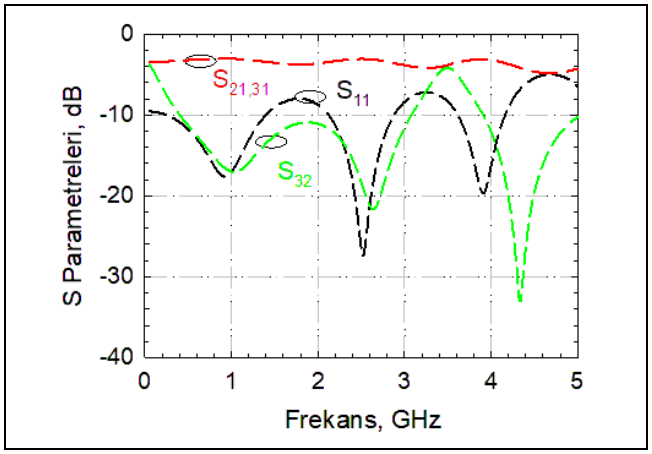
İki kez ardışık bağlı iki yollu Wilkinson Güç Bölücü modelinde, geleneksel Wilkinson Güç Bölücünün iletim hatları menderes yapılı hale getirilmiş ve yavaş dalga etkisi ile minyatürizasyon sağlanması amaçlanmıştır. Buna ek olarak, iletim hatları iki kez ardışık bağlanarak kaskat bağlı bir yapı oluşturulmuştur.

Geleneksel Wilkinson iki yollu güç bölücünün iletim hatları arasına 100 Ω değerinde bir direnç yerleştirilmiş ve daha sonra iki adet iletim hattının seri bağlanmasıyla iki kez ardışık bağlanmış güç bölücü modeli elde edilmiştir. Bu tasarımın merkez frekansı 1 GHz'dir. Tasarlanan devre modeli Şekil 4'te verilmiş olup, devre boyutu dalga boyu cinsinden $0.56\lambda_g \times 0.18\lambda_g$'dir. Bu devreye ait simülasyon sonuçları Şekil 5'te sunulmuştur. Simülasyon sonuçlarına göre, 0.17-1.36 GHz frekans aralığında ortalama geri dönüş kaybı -13.40 dB, iletim kaybı ise -3.19 dB ve çıkış portları arasındaki izolasyon değeri ise -13.32 dB'dir.



Şekil 4. İki yollu iki segmentli devre modeli.

Figure 4. Twice cascaded two-way circuit model.

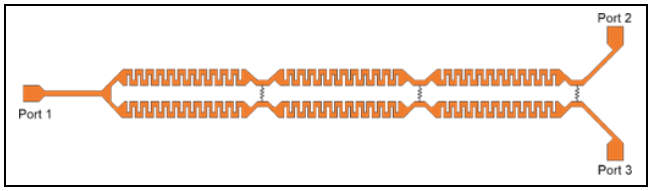


Şekil 5. İki yollu iki segmentli devreye ait S parametrelerinin frekansa göre değişim grafiği.

Figure 5. Frequency response of S parameters of a two-way circuit cascaded twice.

2.1.2 Üç kez ardışık bağlı iki yollu Wilkinson güç bölücü

Çalışmanın bu kısmında, iletim hatları menderes yapı ile modifiye edilmiş geleneksel Wilkinson iki yollu güç bölücünün iletim hatlarının seri olarak üç kez kaskat bağlanmasıyla oluşturulan iki yollu tasarım sunulmuştur. Her bağlantı noktasına 100 Ω izolasyon direnci yerleştirilerek çıkış kapıları arasındaki yüksek izolasyon değeri sağlanmıştır. Burada devrenin merkez frekansı 0.57 GHz'dir. Devrenin boyutları dalga boyu cinsinden $0.79\lambda_g \times 0.18\lambda_g$ olarak ölçülmüştür. Bu devre tasarımı Şekil 6'da gösterilmiştir.



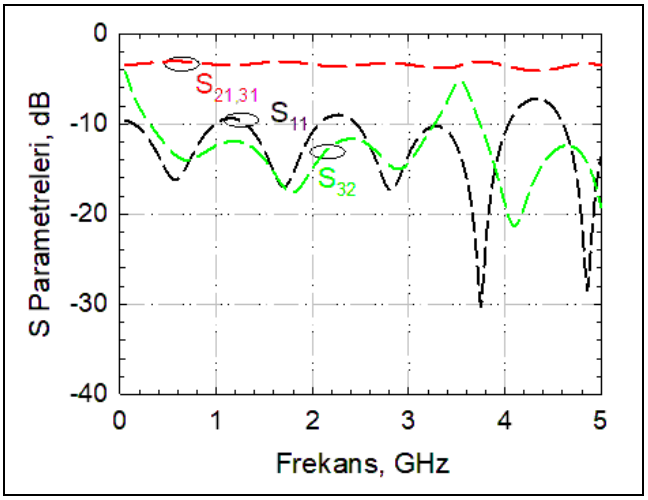
Şekil 6. İki yollu üç segmentli devre modeli.

Figure 6. Two-way circuit model cascaded three times.

Tasarıma ait 0.11-1.05 GHz frekans aralığında ortalama geri dönüş kaybı -12.65 dB, iletim kaybı -3.22 dB ve izolasyon değeri -11.80 dB'dir. Bu tasarıma ait iletim kaybını, geri dönüş kaybını ve izolasyon değerini ifade eden S parametreleri Şekil 7'de verilmiştir.

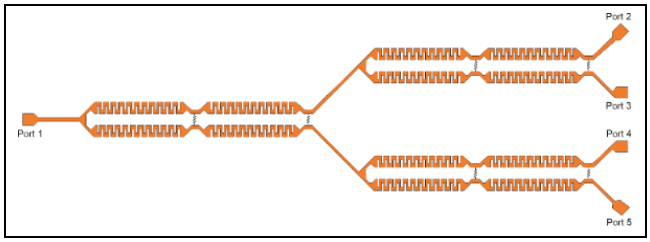
2.2 İki kez ardışık bağlı dört yollu Wilkinson güç bölücü

İletim hatlarının ardışık olarak iki kez kaskat bağlanmasıyla dört yollu Wilkinson Güç Bölücü tasarlanmıştır. Önceki bölümlerde olduğu gibi, bu bölümde de menderes yapılı iletim hatları kullanılmaktadır. Tasarlanan dört yollu Wilkinson Güç Bölücü Şekil 8'de gösterilmektedir.



Şekil 7. İki yollu üç segmentli devreye ait S parametrelerinin frekansa göre değişim grafiği.

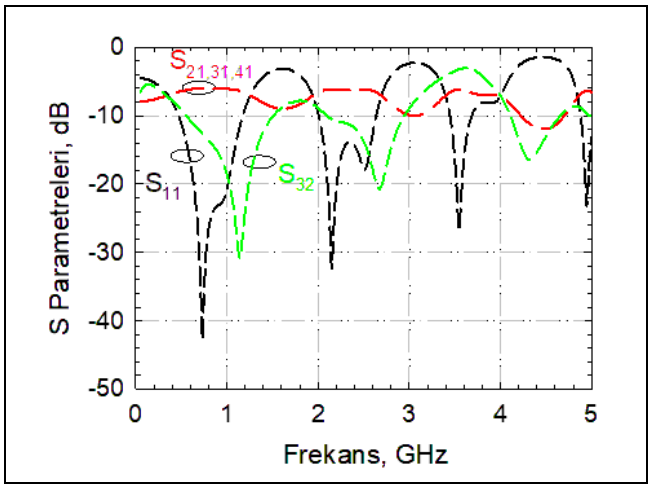
Figure 7. Frequency response of S parameters of three times cascaded.



Şekil 8. Dört yollu iki segmentli devre modeli.

Figure 8. Four-way circuit model connected twice consecutively.

Şekilden görüldüğü üzere, Port 1'den sonra menderes yapılı iletim hatları iki kez kaskat bağlanmış, ardından hatlar iki yola ayrılmış ve sonra tekrar iki kez ardışık olarak bağlanmıştır. Her bağlantı arasına 100 Ω'luk izolasyon direnci yerleştirilerek çıkış portları arasındaki yüksek izolasyon sağlanmaktadır. Tasarlanan devrenin simülasyon sonuçları Şekil 9'da gösterilmiştir. Bu devrenin merkez frekansı 0.73 GHz'dir. Devrenin boyutları dalga boyu cinsinden $1.1\lambda_g \times 0.31\lambda_g$ olarak ölçülmüştür. 0.47-1.17 GHz frekans aralığında ortalama geri dönüş kaybı -20.66 dB, iletim kaybı -6.17 dB ve çıkış kapıları arasındaki izolasyon değeri -15.87 dB'dir.

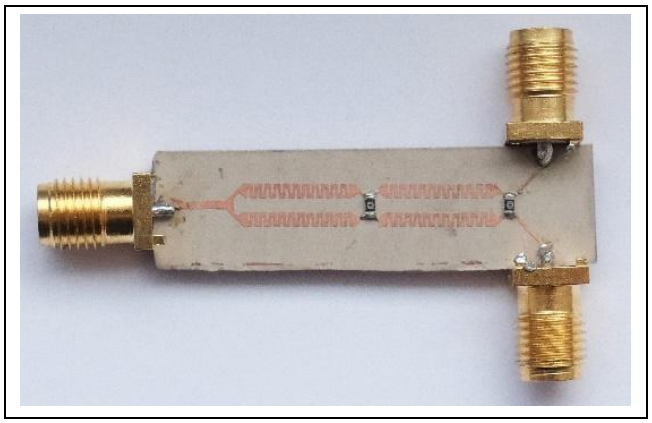


Şekil 9. Dört yollu iki segmentli devre modeline ait S parametrelerinin frekansa bağlı değişim grafiği.

Figure 9. Frequency response of S parameters of the four-way circuit model cascaded.

3 Deneysel çalışmalar

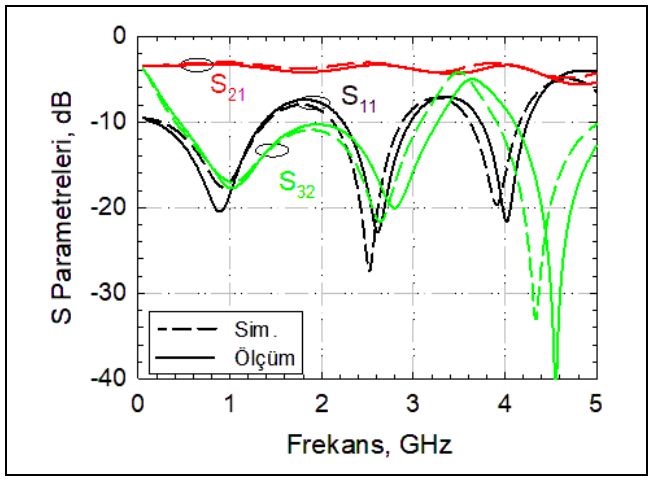
Tasarımların doğruluğunu doğrulamak amacıyla tüm devreler imal edilmiş ve ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, Keysight PNA N5222A Ağ Analizörü kullanılarak yapılmıştır. Kullanılan cihaz dört portlu olduğu için, dört yollu devrenin boşta kalan portu 50 Ω uyumlu yükle sonlandırılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 10'da imal edilen iki kez kaskat bağlanmış iki yollu Wilkinson güç bölücünün fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 10. İki yollu iki segmentli yapının imal devre fotoğrafı.

Figure 10. Photograph of a two-way circuit cascaded twice.

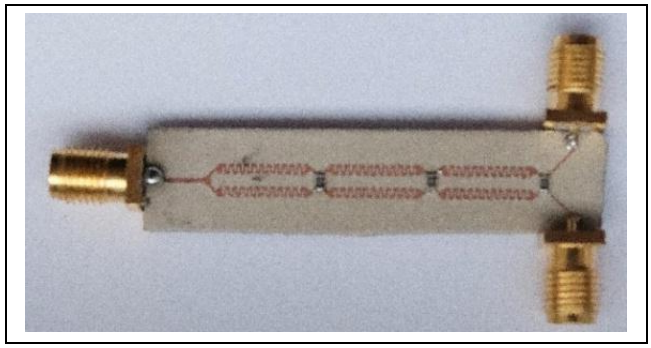
Şekil 11'de ise imal edilen devreye ait ölçüm ve simülasyon sonuçları gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere, iletim kaybı simülasyon değerleriyle uyumlu olarak 0.17-1.36 GHz frekans bandında ortalama -3.40 dB, geri dönüş kaybı ise aynı frekans bandında ortalama -14.45 dB, çıkış portları arasındaki izolasyon değeri ise ortalama 13.25 dB olarak ölçülmüştür. Bu devrenin kısmi bant genişliği, ilgili frekans bandında -10 dB için %155.56, 2.24-2.97 GHz frekans bandında ise geri dönüş kaybı ortalama -15.45 dB, iletim kaybı -3.5 dB, izolasyon değeri ise 15.93 dB olarak ölçülmüştür. Bu frekans bandındaki kısmi bant genişliği ise %28.02 olarak hesaplanmıştır. Menderes yapılı iletim hatları sayesinde geleneksel Wilkinson güç bölücüsüne kıyasla yaklaşık olarak %18 oranında bir boyut küçültme sağlanmıştır.



Şekil 11. İki yollu iki segmentli yapının simülasyon ve ölçüm sonuçları.

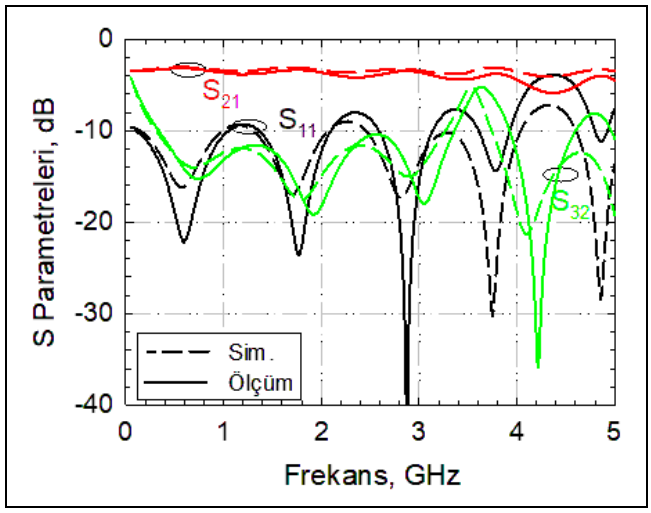
Figure 11. Frequency response of simulation and measurement results of two times cascaded two-way circuit.

Şekil 12'de, üç kez ardışık olarak bağlanmış iki yollu devrenin imal edilmiş fotoğrafı verilmiştir. Bu devreye ait S parametrelerinin frekansa bağlı değişim grafiği Şekil 13'te gösterilmiştir.



Şekil 12. İki yollu üç segmentli yapının imal devre fotoğrafı.

Figure 12. Photograph of three times cascaded two-way circuit..

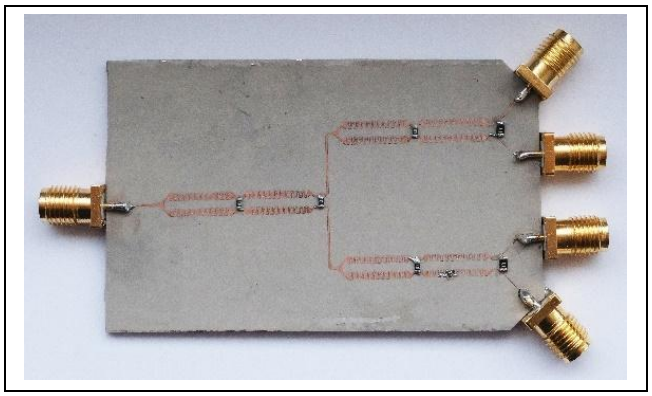


Şekil 13. İki yollu üç segmentli yapıya ait ölçüm ve simülasyon sonuçları.

Figure 13. Frequency response of measurement and simulation three times cascaded two-way circuit.

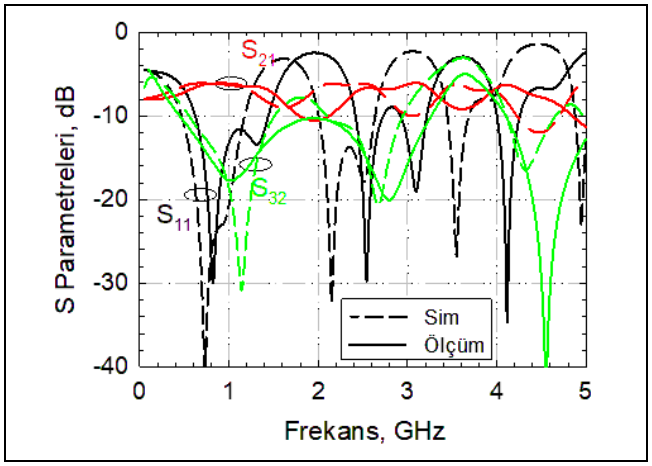
0.11-1.05 GHz frekans bandında iletim kaybı -3.38 dB, geri dönüş kaybı -14.73 dB ve izolasyon değeri -12.20 dB'den daha iyi olarak ölçülmüştür. İmal edilen devrenin izolasyon dirençlerinin konumlarının farklı olmasından dolayı izolasyon değerlerinde frekans bandında kaymalar gözlemlense de, ölçüm sonuçlarının tasarlanan devre ile iyi derecede örtüştüğü gözlenmektedir. Bu frekans bandında, 10 dB için kısmi bant genişliği %162.07 olarak hesaplanmıştır. 1.36-2.10 GHz frekans bandında ortalama iletim kaybı -3.54 dB, geri dönüş kaybı -15.21 dB, izolasyon değeri ise -15.34 dB olarak ölçülmüştür. Bu frekans bandında, kısmi bant genişliği %42.78 olarak hesaplanmıştır. 2.59-3.14 GHz frekans bandında, ortalama iletim kaybı-3.65 dB, geri dönüş kaybı -17.52 dB, izolasyon değeri ise -14.03 dB olarak ölçülmüştür. Bu frekans bandında, kısmi bant genişliği %19.20 olarak hesaplanmıştır. Bu devre, geleneksel Wilkinson güç bölücüsüne kıyasla %25 oranında bir minyatürizasyon sağlamıştır.

İki kez ardışık olarak bağlanmış dört yollu devrenin imal edilmiş fotoğrafı Şekil 14'te verilmiştir. Bu devreye ait bazı S parametreleri Şekil 15'te verilmiştir.



Şekil 14. Dört yollu iki segmentli yapının imal devre fotoğrafı.

Figure 14. Photograph of a four-way circuit cascaded twice.



Şekil 15. Dört yollu iki segmentli yapının ölçüm ve simülasyon sonuçları.

Figure 15. Frequency respond of measurement and simulation results of the four-way circuit cascaded twice.

Devrenin simetrik olmasından dolayı yalnızca bazı S parametreleri verilmiştir. 0.47-1.17 GHz frekans bandında ortalama geri dönüş kaybı –20.65 dB, iletim kaybı -6.17 dB ve izolasyon değeri de -15.87 dB olarak ölçülmüştür. Bu frekans bandında kısmi bant genişliği %85.37 olarak hesaplanmıştır. 2.01-2.63 GHz frekans bandında ise, ortalama geri dönüş kaybı –16.74 dB, iletim kaybı -6.26 dB ve izolasyon değeri -12.17 dB olarak ölçülmüştür. Bu frekans bandındaki kısmi bant genişliği ise %26.72 olarak hesaplanmıştır.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada iki ve üç kez ardışık bağlı iki yollu devreler ile iki kez ardışık bağlı dört yollu devre tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan devrelerin boyutları, iki yollu devreler için iki kez ardışık bağlı ve üç kez ardışık bağlı olanlar için sırasıyla $0.56\lambda_g \times 0.18\lambda_g$, $0.79\lambda_g \times 0.18\lambda_g$ ve dört yollu iki kez ardışık bağlı devre için $1.1\lambda_g \times 0.31\lambda_g$ olarak ölçülmüştür. İki kez ardışık bağlı iki yollu devrenin birinci bandında ortalama geri dönüş kaybı -14.45 dB, iletim kaybı -3.40 dB ve izolasyon değeri -13.25 dB; ikinci bandında ise geri dönüş kaybı -15.45 dB, iletim kaybı -3.50 dB ve izolasyon değeri -15.93 dB olarak ölçülmüştür. Üç kez ardışık bağlı iki yollu devrede birinci bandında ortalama geri dönüş kaybı -14.73 dB, iletim kaybı -3.38 dB ve izolasyon değeri -12.20 dB; ikinci bandında ortalama geri dönüş kaybı -15.21 dB, iletim kaybı -3.54 dB ve izolasyon değeri -15.34 dB; üçüncü bandında ise ortalama geri dönüş kaybı -17.52 dB, iletim kaybı -3.65 dB ve izolasyon değeri -14.03 dB olarak ölçülmüştür. Dört yollu, iki kez ardışık bağlanmış yapıda ise birinci bandında ortalama geri dönüş kaybı -20.65 dB, iletim kaybı -6.17 dB ve izolasyon değeri -16.74 dB; ikinci bandında ise geri dönüş kaybı -16.74 dB, iletim kaybı -6.26 dB ve izolasyon değeri -12.17 dB olarak ölçülmüştür. Tasarlanan devreler imal edilmiş ve simülasyon sonuçlarının ölçüm sonuçlarıyla uyumlu olduğu gözlenmiştir. İmal edilen devrelerle tasarlanan devrelerin S parametreleri iyi bir şekilde örtüşmektedir. Tasarlanan devrelerin özellikle anten dizileri başta olmak üzere birçok mikrodalga devresinde kullanılacağı düşünülmektedir. Tablo 1'de diğer çalışmalarla bu çalışma arasındaki kıyaslamalar verilmiştir.

5 Conclusions

In this study, designs for two-way circuits connected in series twice, three times, and four-way circuits connected in series twice have been developed. The dimensions of the designed circuits were measured as $0.56\lambda_g \times 0.18\lambda_g$ for the two-way circuit connected twice, $0.79\lambda_g \times 0.18\lambda_g$ for the three times connected two-way circuit, and $1.1\lambda_g \times 0.31\lambda_g$ for the four-way circuit connected twice. For the two-way circuit connected twice, the average return loss in the first band was -14.45 dB, insertion loss -3.40 dB, and isolation value better than -13.25 dB. In the second band, the return loss was -15.45 dB, insertion loss -3.50 dB, and isolation value better than -15.93 dB. For the two-way circuit connected three times, the average return loss in the first band was -14.73 dB, insertion loss -3.38 dB, and isolation value -12.20 dB. In the second band, the return loss was -15.21 dB, insertion loss -3.54 dB, and isolation value -15.34 dB. In the third band, the return loss was -17.52 dB, insertion loss -3.65 dB, and isolation value -14.03 dB. In the four-way circuit connected twice, the average return loss in the first band was -20.65 dB, insertion loss -6.17 dB, and isolation value -16.74 dB. In the second band, the return loss was -16.74 dB, insertion loss -6.26 dB, and isolation value -12.17 dB. The designed circuits were manufactured, and it was observed that the simulation results were consistent with the measurement results. The S parameters of the manufactured circuits closely matched those of the designed circuits. It is anticipated that the designed circuits will be used in various microwave applications, particularly in antenna arrays.

Tablo 1. Önceki çalışmalar ile kıyaslamalar.

Table. 1. Comparisons with previous studies.

	S_{11}	S_{21}	S_{32}	Alan ($mm^{2)}$	Çalışma frekansı (GHz)
Bu çalışmada	17.52 dB	-3.66 dB	14.03 dB	29.6*10.5	0-5
Referans [11]	36 dB	-3.16 dB	16 dB	295.6	0-3
Referans [20]	10 dB	-3.09 dB	13.56 dB	22*15	3.1-10.6
Referans [21]	25	-3.7	25	6.33*22.1	1-4

6 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Mehmet Çakır, literatür taraması, devre imalatı ve ölçümü; Ceyhun Karpuz, simülasyon, tasarımın ortaya koyulması, teorik çalışmalar, konularında katkı sunmuşlardır.

7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur". "Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır".

8 Kaynaklar

[1] Xu X, Tang X. "A design approach for dual-band wilkinson power divider with two pairs of coupled-line sections". *Progress In Electromagnetics Research Letters,* 45, 81–87, 2014.

[2] Wilkinson EJ. "An N-way hybrid power divider". *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques,* 8(1), 116–118, 1960.

[3] Pozar DM. *Microwave Engineering*. 3rd ed. Hoboken, New Jersey, USA, John Wiley & Sons, Inc., 2005.

[4] Imani MS, Hayati M. "Compact Wilkinson power divider with extensive suppression of harmonics, using a combination of trapezoidal, circular and rectangular resonators". *International Journal of Electronics and Communications (AEÜ),* 139, 1-10,2021.

[5] Karimi G, Menbari S. "A novel Wilkinson power divider using lowpass filter with harmonics suppresion and high fractional bandwith". *Microelectronics Journal,* 71(6), 61-69, 2018.

[6] Moloudian G, Soltani S, Bahrami S, Buckley JL, O'Flynn B, Lalbakhsh A. "Design and fabrication of a Wilkinson power divider with harmonic suppression for LTE and GSM applications". *Scientific Reports,* 13(1), 1-15, 2023.

[7] Liu Y, Sun S, Zhu L. "Design of n-way wideband filtering power dividers with good port–port isolation". *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,* 69(7), 3298-3306, 2021.

[8] Roshani S, Koziel S, Roshani S, Mehr FSH, Szczepanski S. "Design and implementation of a dual-band filtering wilkinson power divider using coupled T-shaped dual-band resonators". *Energies,* 15(3), 1-12, 2022.

[9] Abdelrahman BM, Ahmed HN, Nashed AI. "A novel tri-band wilkinson power divider for multiband wireless applications". *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 27(10), 891-893, 2017.

[10] Younesiraad H, Bemani M, Fozi M. "A novel fully planar quad band Wilkinson power divider". *International Journal of Electronics and Communications (AEÜ),* 74, 75–82, 2017.

[11] Li JL, Qu SW, Xue Q. "Capacitively loaded Wilkinson power divider with size reduction and harmonic suppression". *Microwave and Optical Technology Letters,* 49(11), 2737-2739, 2007.

[12] Lotfi S, Roshani S, Roshani S. "Design of a miniaturized planar microstrip Wilkinson power divider with harmonic cancellation". *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences,* 28(6), 3126-3136, 2020.

[13] Kumar M, Islam SKN, Sen G, Parui SK, Das S. "Miniaturization of dual-band Wilkinson power divider using dual transmission line". *IEEE Applied Electromagnetics Conference*, Aurangabad, India, 19-22 December 2017.

[14] Phan HP, Vuong TP, Nguyen TT, Luong MH, Iitsuka Y, Hoang MH. "Simple miniaturized Wilkinson power divider using a compact stub structure". *International Conference on Advanced Technologies for Communications*, Ho Chi Minh City, Vietnam, 14-16 October 2015.

[15] Imani MA, Shama F, Alirezapoori M, Haghiri S, Ghadrdan A. "Ultra-Miniaturized wilkinson power divider with harmonics suppression for wireless applications". *Journal of Electromagnetic Waves and Applications,* 33(14), 1920-1932, 2019.

[16] Karpuz C, Gorur AK, Cakir M, Cengiz A, Gorur A. "Compact Wilkinson power dividers based on narrow slits loaded transmission lines". *IEEE Radio and Wireless Symposium,* Las Vegas, NV, USA, 22-25 January 2023.

[17] Karpuz C, Cakir M, Gorur AK, Gorur A. "Design of n-way Wilkinson power dividers with new input/output arrangements for power-halving operations". *Applied Science,* 13(11), 1-21, 2023.

[18] Watkins GT. "A 1:8 cascaded Wilkinson power divider". *44th European Microwave Conference,* Rome, Italy, 6-9 October 2014.

[19] Forte GGS, Fontgalland G, Silva HS. "Polarization detection of electromagnetic waves using cascaded wilkinson power dividers". *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 30(8), 833-835, 2020.

[20] Osman SAM, El-Tager AME, Abdelghany FI, Hafez IM. "Two-Way Modified Wilkinson Power Divider for UWB Applications Using Two Sections of Unequal Electrical Lengths". *Progress in Electromagnetics Research C,* 68, 221-233, 2016.

[21] Da K, Yi-Hsin P, Hsin-Hao C. "A compact wilkinson power divider/combiner with two-section coupled lines for harmonics suppression". *2012 Asia Pacific Microwave Conference Proceedings,* Kaohsiung, Taiwan, 4-7 December 2012.

Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 31(7), 1245-1254, 2025

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Afyonkarahisar rüzgâr enerji potansiyelinin TR33 kalkınma bölgesi illeriyle karşılaştırmalı analizi ve örnek bir fizibilite

Comparative analysis of Afyonkarahisar wind energy potential with TR33 development region provinces and a sample feasibility

Fatih Serttaş[1*]

[1]Elektrik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, Türkiye.
fserttas@aku.edu.tr, serttasf@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 10.01.2025 Düzeltme Tarihi/Revision: 03.03.2025 doi: 10.5505/pajes.2025.58535
Kabul Tarihi/Accepted: 10.04.2025 Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Artan enerji ihtiyacı, fosil yakıtların tüketimlerinin artması, küresel ısınma ve karbon salınım değerlerinin yükselmesi nedeniyle tüm dünyada yenilenebilir enerji kullanımı yaygınlaşmaktadır. Ülkemizde de yenilenebilir enerji yatırımları, geçtiğimiz yıllarda büyük bir ivmeyle artış göstermiştir. Afyonkarahisar ili, günümüzde yalnızca gastronomisiyle değil, artan yenilenebilir enerji tesisleriyle de ön plana çıkmaktadır. Rüzgâr enerjisi kurulu gücü 350 MW olan ve Türkiye'nin en büyük rüzgâr enerji santrallerinden birini il sınırları içerisinde barındıran Afyonkarahisar'ın rüzgârdan ürettiği güç, yeni kurulan türbinlerle gün geçtikçe artış göstermektedir. Bu çalışmada Afyonkarahisar'ın rüzgâr enerji potansiyeli analiz edilmiş, TR33 bölgesindeki diğer illerle karşılaştırmalar yapılmış, bölgede yapılması olası enerji yatırımlarının uygulanabilirliği değerlendirilmiş ve uluslararası endüstriyel standartlardaki WAsP yazılımıyla simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca rüzgâr enerji santrallerinin bölgenin kalkınmasına etkileri de tartışılmıştır.

Anahtar kelimeler: Afyonkarahisar, Enerji, Rüzgâr enerjisi, TR33 bölgesi, WAsP.

Abstract

Due to the increasing energy demand, increasing consumption of fossil fuels, global warming, and rising carbon emission values, renewable energy use is becoming widespread worldwide. Renewable energy investments in our country have also increased rapidly in recent years. Afyonkarahisar province stands out not only in its gastronomy but also in its growing renewable energy facilities. Afyonkarahisar, which has an installed wind energy capacity of 350 MW and hosts one of the largest wind energy plants in Turkey within the provincial borders, is increasing the power it produces from wind day by day with newly installed turbines. In this study, the wind energy potential of the Afyonkarahisar is analyzed, comparisons are made with other provinces in the TR33 region, the feasibility of possible energy investments in the area is evaluated, and simulations are carried out with the WAsP software at international industrial standards. In addition, the effects of wind energy plants on the region's development are discussed.

Keywords: Afyonkarahisar, Energy, Wind energy, TR33 region, WAsP.

1 Giriş

Afyonkarahisar bölgesi, Türkiye'nin rüzgâr enerji potansiyeli açısından önem taşıyan bölgelerinden biri olarak dikkat çekmektedir. Yapılan çalışmalar, özellikle bölgenin uygun rüzgâr hızlarına sahip olduğunu ve enerji üretimi için elverişli koşullar sunduğunu göstermektedir [1]. Özellikle, rüzgârın sürekliliği ve bölgesel meteorolojik özellikler, Afyonkarahisar'ın enerji üretimi açısından güçlü bir aday olduğunu ortaya koymaktadır [2]. Bununla birlikte, bölgedeki rüzgâr enerjisi potansiyelinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi, gelecekteki enerji projeleri için kritik bir rol oynayacaktır [3].

Ülkenin enerji stratejisi, sürdürülebilir enerjiye olan talebi karşılamak ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak amacıyla yenilenebilir kaynaklardan yararlanmaya daha fazla odaklanmaktadır. Türkiye'nin teorik rüzgâr enerjisi kapasitesinin yıllık yaklaşık 160 teravat saat olduğu tahmin edilmekte olup, Marmara, Ege ve Güneydoğu Anadolu bölgeleri rüzgâr enerjisi geliştirilmesi açısından yüksek uygunluğa sahip bölgeler olarak öne çıkmaktadır [4]. Bu bölgelerdeki rüzgâr hızlarının 3 m/s'nin üzerinde olması, geniş çapta rüzgâr enerjisi üretimi için ideal koşulları sağlamaktadır.

Son çalışmalar, Türkiye'nin toplam rüzgâr enerjisi potansiyelinin yaklaşık 131.756,40 MW'a ulaştığını ve deniz rüzgârı enerjisi kapasitesinin de kayda değer olduğunu göstermektedir [5]. Bu potansiyelin kullanımı, kurulu rüzgâr enerjisi kapasitesinin 1998 yılında sadece 1,5 MW iken 2010 yılına gelindiğinde 1522,20 MW'a yükselmesiyle önemli bir artış göstermiş, sektördeki yatırımlar ve teknolojik ilerlemeler hız kazanmıştır [5].

Rüzgâr enerjisi fizibilitesi, bir bölgedeki rüzgâr kaynağının belirlenmesi, uygun türbin seçimi, enerji üretiminin tahmin edilmesi ve ekonomik analizlerin yapılmasını içerir. Bu süreçte, meteorolojik veriler, arazi özellikleri, çevresel faktörler ve sosyo-politik etkiler gibi birçok değişken dikkate alınır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, rüzgâr enerjisi fizibilitesi için gelişmiş modelleme yöntemlerinin ve yazılımların kullanıldığını göstermektedir. Örneğin, Umman'daki bir kıyı bölgesinde rüzgâr enerjisi potansiyeli, WRF modeli ile değerlendirilmiş ve farklı türbin tipleri için enerji üretimini tahmin edilmiştir [25]. Benzer bir fizibilite çalışmasında, Cezayir'deki uzak bir bölge için hibrit bir yenilenebilir enerji sisteminin (rüzgâr, güneş ve dizel) teknik ve ekonomik fizibilitesi araştırılmıştır. HOMER Pro yazılımı kullanılarak sistemin optimizasyonu yapılmış ve maliyet analizi gerçekleştirilmiştir [26]. Başka bir çalışmada ise, Çin'deki Bohai

*Yazışılan yazar/Corresponding author

Denizi'nde bir açık deniz rüzgâr çiftliği için yüksek çözünürlüklü bir meteoroloji modeli kullanarak rüzgâr verilerini analiz etmiş ve türbin yerleşimini optimize etmiştir [27]. Bu çalışmalar, rüzgâr enerjisi fizibilitesinde kullanılan gelişmiş teknikleri ve modelleri göstermesi açısından önemlidir.

Rüzgâr enerjisi projelerinin başarısında sadece teknik ve ekonomik faktörler değil, sosyo-politik faktörler de önemli bir rol oynamaktadır. Halkın kabulü, paydaşların katılımı ve çevresel etkiler gibi konular, projelerin ilerleyişini ve başarısını etkileyebilir. Almanya ve Danimarka'daki rüzgâr enerjisine halkın kabulü karşılaştırmalı olarak incelemiş ve algılanan faydalar, riskler, güven ve katılımın kabul üzerindeki etkileri analiz edilmiştir [28]. Bir diğer çalışmada ise Amerika Birleşik Devletleri'ndeki rüzgâr enerjisi projelerinin toplum faydaları ve sosyal kabul arasındaki ilişkisi araştırılmıştır [29]. Bu çalışmalar, rüzgâr enerjisi projelerinin sosyo-politik boyutlarının dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır.

Bu çalışmalara ek olarak, Truong Vietnam'da rüzgâr enerjisi santralinin fizibilitesini değerlendirmiş ve bölgedeki rüzgâr potansiyelini belirleyerek uygun türbin seçimi ve enerji üretimi tahminlerini yapmıştır [30]. Ghimire ve diğ. Nepal'in farklı bölgelerinde rüzgâr enerjisi kaynak değerlendirmesi ve fizibilite çalışmaları gerçekleştirmişlerdir [32]. Özellikle Mustang bölgesindeki çalışmalarında, nehir yatağının rüzgâr potansiyelini detaylı olarak incelemişlerdir. Malik Umman'da büyük ölçekli rüzgâr enerjisi entegrasyonunu da içeren bir üretim genişletme planlaması çalışması yaparak, rüzgâr enerjisinin ülke enerji sistemine katkısını araştırmıştır [33]. Himri ve diğ. ise Cezayir'in güneybatı bölgesindeki rüzgâr enerjisi potansiyelini belirleyerek, ekonomik fizibilite analizleri yapmışlardır [38].

Reutter [31] ve Sveinbjornsson [34] ise WAsP programının karmaşık ve ormanlık arazi koşullarında kullanımını inceleyerek, programın bu tür bölgelerdeki doğruluğunu ve güvenilirliğini değerlendirmişlerdir. Bu çalışmalar, WAsP'ın farklı arazi tiplerinde rüzgâr enerjisi potansiyelini doğru bir şekilde tahmin etmede ne kadar etkili olduğunu göstermesi açısından önemlidir.

Bu çalışmalar, rüzgâr enerjisi fizibilitesinde kullanılan gelişmiş teknikleri, farklı coğrafi bölgelerdeki uygulamaları ve modelleme yaklaşımlarını göstermesi açısından önemlidir. Farklı ülkelerdeki rüzgâr enerjisi projelerinin fizibilitesi üzerine yapılan bu çalışmalar, rüzgâr enerjisinin küresel ölçekte ne kadar önemli bir yenilenebilir enerji kaynağı olduğunu ve farklı coğrafyalarda nasıl değerlendirilebileceğini göstermektedir.

WAsP yazılımının rüzgâr enerjisi çalışmalarında sıklıkla kullanıldığı, [35],[36],[39],[41] ve [43]'deki çalışmalarda da vurgulanmıştır. Bu çalışmalar, WAsP'ın rüzgâr enerjisi projelerinde ne kadar yaygın olarak kullanılan ve güvenilir bir araç olduğunu göstermektedir. WAsP, rüzgâr atlası oluşturma, rüzgâr akışı simülasyonu, türbin yerleşimi optimizasyonu ve enerji üretimi tahmini gibi birçok farklı amaç için kullanılabilmektedir.

Rüzgâr ve güneş enerjisini bir arada kullanan hibrit yenilenebilir enerji sistemleri, Türkiye'nin artan elektrik talebine güvenilir bir çözüm olarak önerilmektedir [6]. Bu sistemler, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltırken çevresel etkileri en aza indirerek sürdürülebilir enerji üretimine katkı sağlamaktadır [7]. Türkiye, Vision 2023 enerji stratejisinin bir parçası olarak, rüzgâr enerjisi kapasitesini önemli ölçüde artırmayı hedeflemekte ve 2023 yılı itibarıyla 20 GW kapasiteye ulaşmayı amaçlamaktadır. Bu hedef, ülkenin hava kirliliğini azaltma ve yenilenebilir enerji kaynakları yoluyla enerji güvenilirliğini artırma taahhüdü ile örtüşmektedir [8].

Bu umut verici gelişmelere rağmen, Türkiye'nin rüzgâr enerjisi sektörü hala bürokratik engeller ve yatırımları artırmak için daha etkili teşviklere ihtiyaç gibi zorluklarla karşı karşıyadır [9]. Bu sorunların ele alınması, ülkenin rüzgâr enerjisi potansiyelinden tam anlamıyla yararlanması ve sürdürülebilir büyümeyi sağlaması açısından kritik öneme sahiptir. Bu makale, Türkiye'nin yenilenebilir enerji manzarasını detaylı bir şekilde inceleyerek, rüzgâr enerjisi potansiyelini, karşılaşılan zorlukları ve gelecekteki yönelimleri ele almaktadır. Yapılan bir diğer çalışmada ise Türkiye'nin toplam teknik rüzgâr enerjisi potansiyelinin yalnızca %4'ünü kullandığı ve bu potansiyelin yeterince değerlendirilebilmesi için daha fazla araştırma ve uygulama çabasına ihtiyaç duyulduğu belirtilmektedir. Bu çalışma, Yalova'nın rüzgâr enerjisi özelliklerini bir yıllık saatlik rüzgâr verileri kullanarak istatistiksel formülasyonlarla analiz etmiştir [10].

Başka bir çalışmada, Ankara'nın İncek bölgesinde rüzgâr enerjisi potansiyeli araştırılmış ve maksimum güç yoğunluğunun mart ayında 98 W/m^2 olduğu tespit edilmiştir. Bu bölge, büyük ölçekli rüzgâr türbini kullanımına uygun olmamakla birlikte, iki küçük ölçekli türbinin Türkiye'deki ortalama bir hanenin yıllık enerji ihtiyacını karşılayabileceği görülmüştür [11].

Türkiye'nin rüzgâr enerjisi potansiyelinin pek çok gelişmiş ülkeden daha yüksek olduğu fakat bu potansiyelin verimliliğinin, ulusal yenilenebilir enerji politikalarının yetersizliği ve teşvik eksikliği nedeniyle düşük kaldığı belirtilmiştir. Enerji planlaması ve yönetimi, Türkiye'de rüzgâr enerjisinin teşvik edilmesi için önem taşımaktadır [12]. Çanakkale ili, Türkiye'nin toplam kurulu rüzgâr gücünün %10'undan fazlasını barındıran ve yıllık ortalama güç yoğunluğu 350 W/m^2'nin üzerinde olan Bozcaada gibi büyük ölçekli elektrik üretimi için yüksek potansiyele sahip bölgeler arasında yer almaktadır [13].

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde Türkiye'nin yüksek bir rüzgâr enerji potansiyeli olduğu, halen yeterince bu potansiyelde yararlanılamadığı görülmekte, ancak Afyonkarahisar ve çevresinin rüzgâr potansiyeli hakkında detaylı bilimsel çalışmalara rastlanılmamaktadır. Bu çalışmanın bölgenin potansiyeli hakkında kaynak niteliğinde olacağı öngörülmektedir. Çalışmanın ilk bölümünde TR33 bölgesi rüzgâr potansiyel haritaları, ikinci bölümünde kullanılan materyal ve yöntem, üçüncü bölümünde Afyonkarahisar'da kurulabilecek örnek bir RES için fizibilite çalışması, dördüncü bölümünde bu santralin fizibilitesinden elde edilen deneysel sonuçlar sunulmuştur. Beşinci bölümde rüzgâr enerji santrallerinin sosyo-politik etkilerinden bahsedilmiş ve son bölümdeyse tartışma ve sonuca yer verilmiştir.

2 Rüzgâr potansiyel haritaları

Çalışmanın bu bölümünde, Global Wind Atlas (GWA) verileri kullanılarak Türkiye'nin TR33 bölgesi, yani Afyonkarahisar, Kütahya, Uşak ve Manisa illerinin rüzgâr enerjisi potansiyeli karşılaştırılmıştır. GWA'nın sağladığı yüksek çözünürlüklü rüzgâr hızı ve güç yoğunluğu haritaları, bu illerin rüzgâr enerjisi üretim kapasitesinin belirlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Her bir ilin coğrafi ve meteorolojik özellikleri

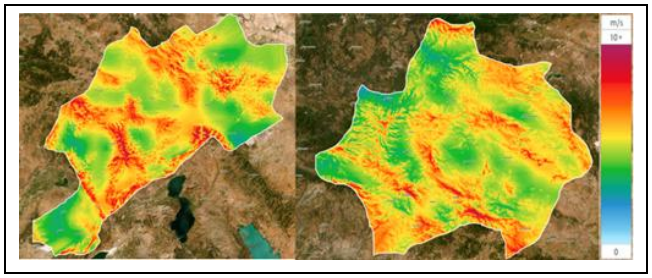
ışığında yapılan bu karşılaştırma, bölgedeki enerji yatırımlarının fizibilitesini değerlendirmeye yardımcı olacak ve yerel enerji politikalarının geliştirilmesine katkıda bulunacaktır. Harita bilgilerini vermeden önce rüzgâr enerjisinin genel özelliklerinden bahsetmek gerekirse, atmosferdeki rüzgâr hareketlerinden elde edilen kinetik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlayan bir yenilenebilir enerji türüdür. Rüzgâr türbinleri aracılığıyla elde edilen bu enerji, çevreye zararlı emisyonlar üretmeden sürdürülebilir enerji kaynağı sunmaktadır. Rüzgâr enerjisi, özellikle rüzgâr hızının yüksek olduğu bölgelerde etkin bir şekilde kullanılır ve fosil yakıtların tükenebilirliği karşısında önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Rüzgâr enerjisinden elde edilecek gücü aşağıdaki bağıntıdan hesaplamak mümkündür.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (1)$$

Burada, P [Watt] rüzgâr gücünü, ρ [kg/m^3] hava yoğunluğunu, A [m^2] rüzgâr türbinindeki rotorun havadaki süpürdüğü alanı, v [m/s] rüzgâr hızını temsil etmektedir [19]. Bağıntıdan da anlaşılacağı üzere, rüzgâr hızı, üretilecek güce çok yüksek oranda etki etmektedir. Hızdaki en ufak bir artış, üretilecek gücü küp oranında artırmaktadır. Bu nedenle rüzgâr santrali kurulmadan önceki dikkat edilmesi gereken en önemli parametre rüzgâr hızlarıdır.

Rüzgâr hız ve güç yoğunluğu analizleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımının sağlanması ve sürdürülebilir enerji üretiminin artırılması açısından büyük önem taşımaktadır. GWA, dünya genelindeki rüzgâr enerji potansiyelini değerlendirmek amacıyla kullanılan kapsamlı bir çevrimiçi platformdur [20]. Danimarka Teknik Üniversitesi (DTU) tarafından geliştirilen bu araç, Dünya Bankası'nın ESMAP (Energy Sector Management Assistance Program) girişimi ile iş birliği yaparak oluşturulmuştur. Global Wind Atlas, dünya çapında yüksek çözünürlüklü rüzgâr hızları ve rüzgâr güç yoğunluğu haritaları sunarak, rüzgâr enerjisi potansiyelini belirlemek isteyen kullanıcılar için değerli bir kaynak sağlamaktadır. WAsP yazılımıyla tam uyumlu halde çalıştığı ve enerji otoritelerince kabul gördüğü için bu çalışmada tercih edilmiştir.

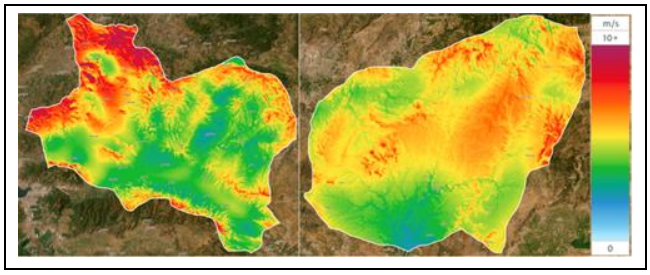
GWA ile, 50 metreden 200 m'ye kadar değişen yüksekliklerde rüzgâr hızları ve rüzgâr gücü potansiyeli hesaplanıp, analiz edilmektedir. Rüzgâr hızı, yüksekliğe bağlı olarak artış göstermektedir. Bu nedenle yüksek noktalarda üretim yoğunluğu artmaktadır. Veriler, meteorolojik modeller ve uydu gözlemleriyle desteklenerek, oldukça hassas tahminler sağlamaktadır. Afyonkarahisar ve Kütahya illerine ait 100 metreden ölçülmüş rüzgâr hızı verilerine göre oluşturulmuş haritalar Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Afyonkarahisar ve Kütahya illeri rüzgâr hızı haritaları.

Figure 1. Wind speed maps for Afyonkarahisar and Kütahya province.

Afyonkarahisar ilinin özellikle Sandıklı ve Dinar bölgelerinde yüksek rüzgâr hızı seviyelerine çıkıldığı görülmekte, halihazırda mevcut yatırımların da özellikle o bölgeler olması konum belirlenmesinde doğru bir noktanın seçildiğine işaret etmektedir. Kütahya ilinin Dumlupınar, Gökler ve Yenikent mevkilerinde yüksek rüzgâr hızı seviyelerine çıkıldığı görülmektedir. Ancak il genelinde baktığımızda, kırmızı bölgelerin az olması daha çok yeşil bölgelerin bulunması nedeniyle, rüzgâr enerji potansiyeli daha düşük görülmektedir. TR33 bölgesindeki diğer iller olan Manisa ve Uşak illerine ait rüzgâr hızı haritaları Şekil 2'de sunulmaktadır.



Şekil 2. Manisa ve Uşak illeri rüzgâr hızı haritaları.

Figure 2. Wind speed maps for Manisa and Uşak province.

Manisa ilinin kuzeybatı bölgesinde, Soma ve Kırkağaç civarında Türkiye ortalamasının oldukça üzerinde, çok yüksek rüzgâr hızlarına ulaşan değerler gözlenmektedir. Uşak ilinde ise genel olarak ortalama rüzgâr hızı değerleri hakimdir. Göze çarpan önemli bir rüzgâr potansiyel noktası izlenmemiştir. GWA uygulaması üzerinden Tablo 1'de verilen TR33 illerinin 100 metre yükseklikten ortalama güç yoğunluğu ve ortalama rüzgâr hızı değerleri elde edilmiştir. Enerji atlası ve Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın ÇED raporlarından illerde kurulu ve yapım aşamasındaki rüzgâr enerji santralleri toplam güçleri elde edilip Tablo 1'e eklenmiştir.

Tablo 1. TR33 Bölgesi illeri rüzgâr potansiyel karşılaştırması

Table 1. Wind potential comparison of the provinces of the TR33 region.

Şehir	Ort. Güç Yoğunluğu (W/m^2)	Ort. Rüzgâr Hızı (m/s)	Mevcut Kurulu Güç (MW)	Kurulum Aşaması Güç (MW)
Afyonkarahisar	495	7.19	350	281
Kütahya	389	6.74	-	222
Uşak	355	6.55	128	3.05
Manisa	680	8.08	712	236.8

Rüzgâr ölçümleri 100 metre yükseklikten yapılmıştır.

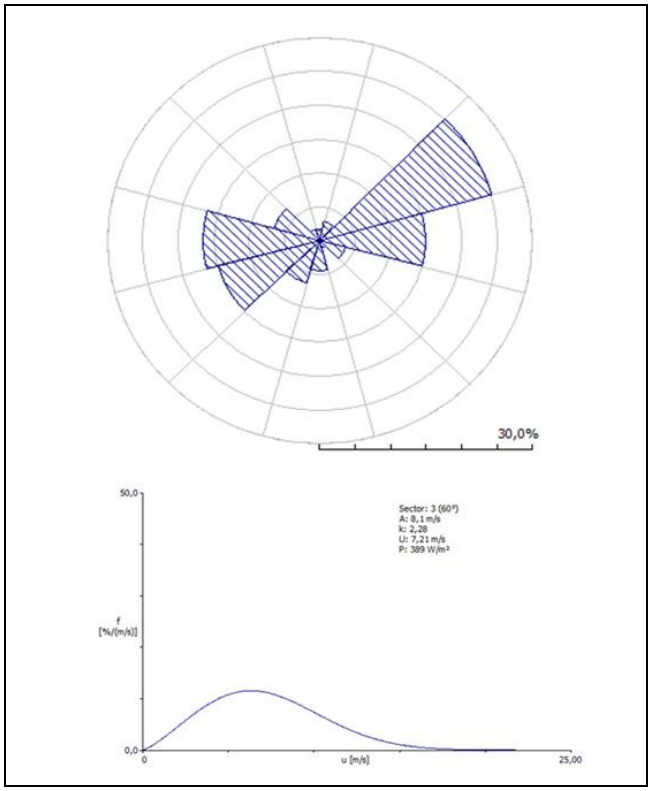
Birim alana düşen rüzgâr güç yoğunluğu incelendiğinde, TR33 bölgesindeki en yüksek rüzgâr potansiyelinin Manisa, ardından sırasıyla Afyonkarahisar, Kütahya ve Uşak illeri olduğu görülmektedir. Rüzgâr hızları da bu duruma benzerlik göstermektedir. Ancak kurulu RES güçleri incelendiğinde Kütahya'nın RES yatırımları için geciktiği görülmekte, kurulum aşamasındaki RES'ler tamamlandığındaysa, diğer illerdeki orana benzer bir ölçekte RES sahibi olacağı görülmektedir. Manisa ilinin özellikle Soma ilçesi bölgesinde rüzgâr güç yoğunluğu çok yüksek değerlere ulaşmaktadır. Yapılan RES yatırımlarının çoğunluğu da bu bölgededir.

3 Materyal ve metot

Rüzgâr enerjisi; harita, makina, elektrik ve enerji sistemleri mühendisliği gibi pek çok disiplinin ortak bir çalışma alanıdır. Ürün olarak yüksek güçte elektrik enerjisi kazanılan sistemlerin maliyetleri de oldukça yüksektir. Bu nedenle kurulum öncesi iyi hazırlanmış bir fizibilite çalışması, planlama aşamasının en önemli bileşenidir.

Rüzgâr enerjisi fizibilitelerinin endüstriyel standartlarda yapılmasında ve bilimsel çalışmaların gerçekleştirilmesinde Danimarka Teknik Üniversitesi'nin WAsP yazılımı dünya genelinde yaygın olarak kabul görmektedir. Bu çalışmada da WAsP programı ile rüzgâr potansiyel haritaları kullanılarak, potansiyel bir RES için üretim değerleri, kaplanacak alan boyutları simülasyonu (benzetimi) gerçekleştirilmiştir. WAsP yazılımı, RES kurulacak arazinin haritasına ve meteorolojik ölçümlerine ihtiyaç duymakta, bu veriler ile güncel rüzgâr türbini verileri üzerinden üretilecek rüzgâr enerjisi değerlerini yüksek doğrulukla hesaplamaktadır.

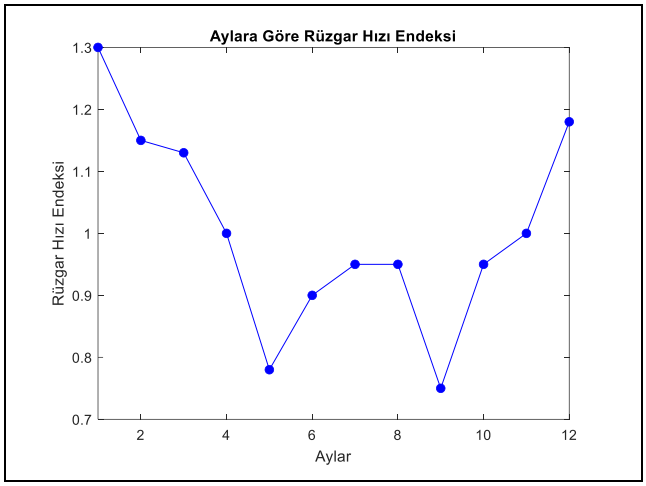
Bu çalışmada, GWA üzerinden indirilen harita ve rüzgâr hız-yön verileri, WAsP programıyla işlenmiş ve Şekil 3'teki rüzgâr yönü ve hızının dağılımını gösteren rüzgâr gülü ve yüksek hızların yoğun olduğu yöndeki hız-frekans grafiği oluşturulmuştur.



Şekil 3. Rüzgâr yön-hız bilgisi ve rüzgâr hız frekansı grafikleri.

Figure 3. Wind rose and wind frequency graphs.

Şekil 3'ten hareketle, GWA'dan alınan verilere göre, Afyonkarahisar'ın en yüksek rüzgâr güç yoğunluğu noktasında rüzgâr yönünün kuzey doğu tarafında olduğu görülmekte, rüzgâr hızı frekansının ise yaklaşık 8-10 m/s hızları aralığında yoğunlaştığı görülmektedir. Yazılım ve veriler ışığında gerçekleştirilen örnek bir fizibilite çalışması, üçüncü bölümde detaylarıyla açıklanmıştır. Seçilen bölge için rüzgâr hızı endeksi grafiği, Şekil 4'te sunulmuştur. Rüzgâr hızı endeksi, rüzgâr hızının ortalama rüzgâr hızına oranıyla elde edilen bir endekstir. Yıl içerisinde artış gösterdiği aylar Ocak ve Aralık, düşüş gösterdiği aylar ise Mayıs ve Eylül aylarıdır. Kış aylarında rüzgâr hızlarının yükseldiğini açıkça yorumlanabilmektedir.



Şekil 4. Rüzgâr hızı endeksi.

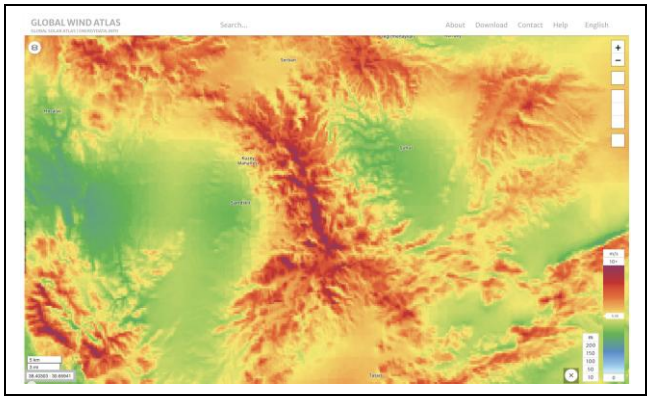
Figure 4. Wind speed index.

4 Bölgede kurulabilecek bir RES fizibilitesi

Çalışmanın TR33 bölgesindeki illere ait rüzgâr potansiyeli karşılaştırmalarının ardından, ikinci kısmında Afyonkarahisar ilinde örnek bir RES senaryosu tasarlayarak fizibilite çalışması gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr hızının yıllık ortalama değerlerinin en yüksek olduğu konumda, Sandıklı ilçesi yakınlarında, örnek bir rüzgâr enerji santrali fizibilitesi, WAsP 11 yazılımıyla gerçekleştirilmiş ve güç üretim değerleri elde edilmiştir. Fizibilite çalışması gerçekleştirilirken öncelikle RES için konum belirlenmiş, ardından türbin çeşidi ve sayısı planlanmış ve üretilecek güç değerleri hesaplanmıştır.

4.1 Konum belirleme

Çalışmada WAsP yazılımı kullanılarak Afyonkarahisar'ın en yüksek rüzgâr potansiyeline sahip olan Sandıklı ilçesi yakınlarında bir bölgede kurulacak örnek bir rüzgâr enerji santrali (RES) senaryosu oluşturulmuş ve bu senaryo üzerinden hesaplamalar yapılmıştır. Konum, GWA verileri incelenerek, kırmızı alanlardan seçilmiştir. Şekil 5'te rüzgâr enerji santralinin kurulacağı alan görülmektedir.



Şekil 5. Senaryoya göre RES kurulacak alan.

Figure 5. The area where RES will be installed according to the scenario.

Analizler, bölgedeki rüzgâr enerjisinin verimliliğini belirlemeye yönelik önemli veriler sunmakta olup, potansiyel enerji üretim miktarlarının belirlenmesine olanak tanımaktadır. Sandıklı ilçesi, coğrafi yapısı ve uygun rüzgâr hızları sayesinde yatırımcılar için büyük bir potansiyel taşımaktadır. Bu nedenle, yapılan çalışmanın, bölgedeki enerji projelerinin fizibilitesini değerlendirmede yol gösterici olacağı düşünülmektedir.

Rüzgâr türbinlerinin konumlandırılması, rüzgâr enerji santrallerinin verimliliği açısından büyük önem taşımaktadır. Türbinler arasındaki mesafe ve konumlandırma stratejileri, özellikle rüzgâr türbini wake etkisini (arkadan gelen hava akımı etkisi) minimize etmek için dikkatlice planlanmalıdır. Wake etkisi, türbinlerin birbirleri üzerindeki negatif etkileşimlerini arttırabilir ve bu durum hem enerji üretiminde azalmaya hem de türbin üzerindeki yüklerin artmasına neden olabilir.

Son çalışmalara göre, wake yönlendirme (wake steering) stratejileri, türbinlerin hem enerji üretimini hem de yorulma yüklerini optimize etmek amacıyla kullanılabilir. Bu stratejiler, türbinlerin ömrünü uzatırken kısa vadede enerji kazançlarını artırmayı hedeflemektedir [14]. Ayrıca, rüzgâr çiftliklerinde türbinlerin birbirlerine olan yan mesafesinin azaltılmasının türbinlerin enerji üretimini %4-9 oranında artırdığı ve bu durumun türbülans yapılarının anlaşılmasıyla daha iyi kontrol stratejileri geliştirilmesine katkı sağladığı görülmüştür [15].

Rüzgâr türbinlerinin wake etkisi, özellikle türbinlerin güç ve itme kuvvetinde azalmaya yol açmakta ve wake asimetrisine neden olmaktadır. Bu da, türbinlerin verimliliğini optimize edebilmek adına yeni güç azaltma stratejilerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır [16]. Ayrıca, wake etkilerinin yüksek türbülans yoğunluğuna ve rüzgâr makaslamasına yol açarak yıllık enerji üretiminde %7'ye varan bir azalmaya ve yorulma yüklerinde %30-50 oranında artışa neden olduğu tespit edilmiştir. Bu da, türbinlerin konumlandırılmasında wake etkisinin dikkate alınmasının önemini göstermektedir [17].

Wake etkisinin azaltılması amacıyla upstream (önceki) türbinlerin optimum ayarların dışında çalıştırılması veya yönlendirilmesi, downstream (sonraki) türbinlerin enerji üretiminde %12'ye varan artışlar sağlayabilmektedir. Bu durum, rüzgâr çiftliklerinin performansını maksimize etmek için upstream türbinlerin ayarlarının stratejik olarak değiştirilmesinin önemine işaret etmektedir [18].

4.2 Mevcut RES konumlarının değerlendirilmesi

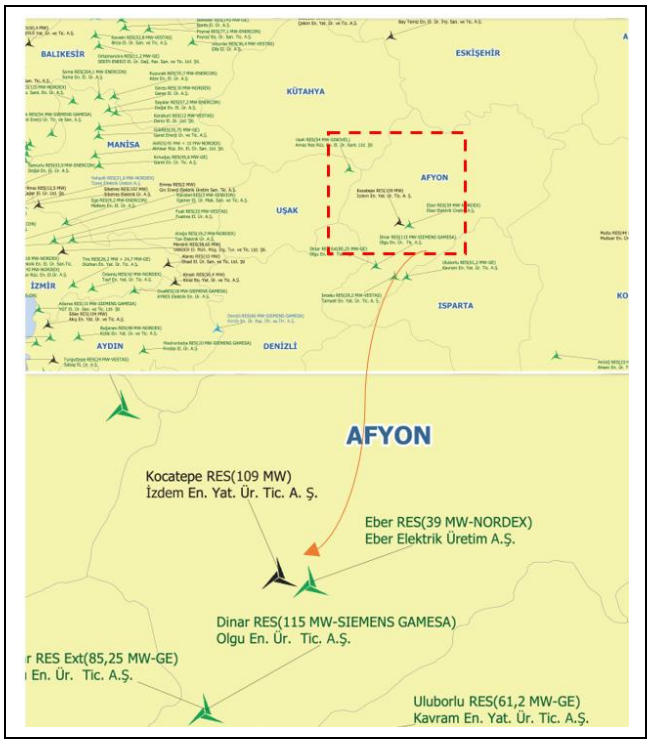
Afyonkarahisar ili, rüzgâr enerjisi santrallerinin toplam 350 MW kurulu gücünün büyük bir yüzdesi Sandıklı–Dinar hattı üzerinde konuşlandırılmış durumdadır. Bu çalışmada seçilen alanda ise halihazırda kurulu RES bulunmaktadır. Şekil 6'da, saha üzerindeki rüzgâr türbinlerinin uydu görüntüleri sunulmuştur. GWA ve WAsP kullanılarak Afyonkarahisar üzerindeki en yüksek rüzgâr güç yoğunluğu tespit edilen noktalara ait koordinatlar, Google Earth kullanılarak incelendiğinde, Şekil 6'da görülen RES'ler gözlenmiş ve bu durum da halihazırda kurulu RES'lerin rüzgâr potansiyeli bakımından konumlarının doğru belirlendiğini göstermiştir.

Belirlenen konumlardaki rüzgâr türbinleri araştırılmış ve Şekil 7'de görülen isim ve lokasyonlara sahip enerji santralleri oldukları anlaşılmıştır. Santrallerin yıllık üretim değerleri 5. Bölüm'de sunulmuş ve makalenin deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.



Şekil 6. Mevcut RES uydu görüntüsü (38°31'28"N 30°21'55"E)

Figure 6. Current wind farms satellite image (38°31'28"N 30°21'55"E).



Şekil 7. Mevcut RES isim ve lokasyon bilgileri.

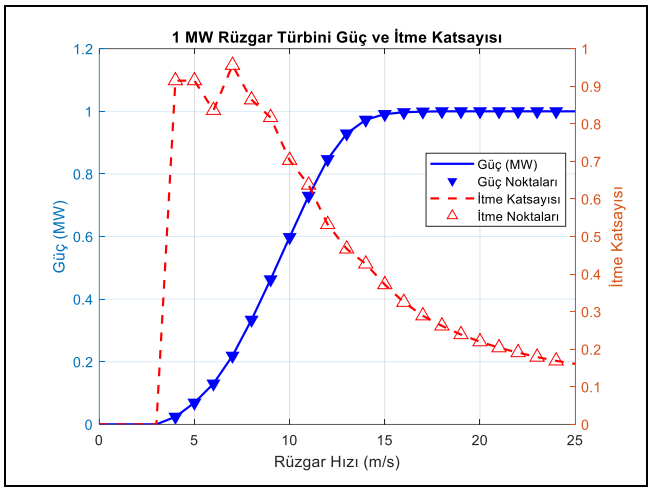
Figure 7. Current wind farm name and location information.

4.3 Rüzgâr türbin sayısı ve kurulu güç hesabı

Rüzgâr türbinlerinde, hava akışı performansını değerlendirmek için, boyutsuz bir katsayı olan *Ct* (thrust coefficient-itme katsayısı) kullanılmaktadır. Denklem (2)'de itme katsayısı gösterilmektedir. Bu çalışmada 1 MW gücünde piyasada sık tercih edilen bir markaya ait rüzgâr türbini modeli seçilmiştir. Rüzgâr türbinine ait güç eğrisi ve itme katsayısı Şekil 8'de sunulmuştur. Çizdirilen güç eğrisi, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılabilir [23]. Seçilen rüzgâr türbini için, 4 m/s hızlarında altında üretim olmamakta, 18 m/s ve üzerindeyse sabit 1 MW güç üretimi yapılabilmektedir.

$$C_t = \frac{F_t}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2} \quad (2)$$

Burada, Ft, türbine etki eden Newton cinsinden itme kuvvetidir. Diğer bileşenler Denklem (1)'in açıklamalarında mevcuttur.



Şekil 8. Seçilen 1 MW rüzgâr türbini için güç–itme eğrisi.

Figure 8. Power-thrust curve for selected 1 MW wind turbine.

Yüksek Ct değerleri mekanik yorgunluk ve hasar riskini artırırken, çok düşük değerler, türbinin rüzgâr enerjisinden yeterince faydalanamadığını gösterebilmektedir.

5 Deneysel çalışma sonuçları

WAsP programının seçilen araziye göre çeşitli yüksekliklerden alınan ölçümlerden ürettiği güçlere ait sonuçlar, Tablo 1'de ekte sunulmuştur. Burada R sınıfı, pürüzlülük sınıfını ifade etmektedir. Sırasıyla 10 metreden, 50, 100, 150 ve 200 m yükseklikler için 5 pürüzlülük sınıfı için güç değerleri listelenmektedir. Ölçülmüş rüzgâr hızı verileri kullanılarak Weibull ve Rayleigh istatistiksel dağılım fonksiyonları ile belirlenen bir bölgenin rüzgâr enerjisi potansiyeli analiz edilmektedir [24]. Weibull dağılımı literatürde mevcut çalışmalarda sıklıkla tercih edilen olasılıksal dağılım fonksiyonudur. Buna dayanarak, rüzgâr hızının farklı yüksekliklerdeki parametrelerini ve enerji yoğunluğunu analiz eden bir veri seti ise Tablo 2'de sunulmaktadır. Weibull parametresi olan A, rüzgâr hızının karakteristik değerini ifade etmektedir. Yükseklik arttıkça A değeri de artış göstermektedir. Örneğin Tablo 2'de görüleceği üzere, 10 metrede 7.20 m/s olan Weibull A, 200 metrede 9.89 m/s'ye ulaşmıştır. Weibull k ise rüzgâr hızının dağılımını ifade eden bir şekil parametresidir. Daha yüksek k değerleri, rüzgâr hızının daha dar bir aralıkta yoğunlaştığını ifade eder. Yüksekliğe bağlı olarak k değeri artış göstermektedir. Bu da hız dağılımının daha tutarlı hale geldiğini gösterir. Güç yoğunluğu, rüzgâr hızının küpü ile orantılı olduğu için, yükseklikle birlikte dramatik şekilde artış göstermektedir. Tablo 2'den görüleceği üzere, 10 m'de 482 W/m² iken, 200 m'de 1119 W/m²'ye çıkmıştır. Bu artış, türbin göbek yüksekliklerinin daha yüksekte olduğu kuleler inşa edilmesi gerekliliğini göstermektedir. Ancak buradaki sınırlayıcı, yüksek ve engebeli arazilerde montaj zorlukları ve ekonomik kısıtlardır.

5.1 Fizibilite amortisman hesabı

Programda seçilen 1 MW gücündeki Bonus üreticisine ait rüzgâr türbini ile bölgeden alınan rüzgâr ve yükselti verileri ışığında beklenen yıllık güç üretimi WAsP programı tarafından 2.484 GWh olarak (gigawatt-saat) olarak hesaplanmıştır.

Karasal rüzgâr enerjisi projeleri için YEKDEM tarafından belirlenen 2030'a kadar alım için birim fiyatı 106 TL-kuruş / kWh (1.06TL/kWh) olarak belirlenmiştir [21]. Bu durumda, Afyonkarahisar Sandıklı civarında kurulmuş, %30 kapasite faktörüne sahip 1 MW'lık ortalama bir rüzgâr türbini için yıllık beklenen kazanç değeri yaklaşık 2.7 milyon TL olarak hesaplanmaktadır. Yeni alınacak bir 1MW'lık rüzgâr türbininin ortalama güncel maliyeti 1.3 milyon $ olarak karşımıza çıkmaktadır [21]. Bu değer alınacak sayıya ve güce bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

Tablo 1. WAsP ile üretilen, yüksekliğe bağlı birim güç değerleri.

Table 1. Height-dependent unit power ratings generated by WAsP.

Yükseklik	Birim	R-Sınıf 0 (0 m)	R-Sınıf 1 (0.03 m)	R-Sınıf 2 (0.10 m)	R-Sınıf 3 (0.4 m)	R-Sınıf 4 (1.5 m)
Yükseklik 1 (z = 10 m)	m/s	6.52	4.6	4.04	3.19	2.16
	Wm²	482	206	133	64	18
Yükseklik 2 (z = 50 m)	m/s	7.68	6.31	5.81	5.05	4.18
	Wm²	734	436	333	218	117
Yükseklik 3 (z = 100 m)	m/s	8.32	7.42	6.87	6.08	5.24
	Wm²	873	593	472	332	204
Yükseklik 4 (z = 150 m)	m/s	8.76	8.31	7.64	6.88	5.89
	Wm²	1031	780	604	455	294
Yükseklik 5 (z = 200 m)	m/s	8.9	8.94	8.25	7.43	6.43
	Wm²	1119	957	745	569	377

Tablo 2. Afyonkarahisar'da seçilen bölge için lokal rüzgâr iklim özeti.

Table 2. Local wind climate summary for the selected region in Afyonkarahisar.

Yükseklik	Parametre	0.00 m	0.03 m	0.10 m	0.40 m	1.50 m
10 m	Weibull A [m/s]	7.20	4.97	4.39	3.48	2.38
	Weibull k	1.46	1.29	1.33	1.35	1.42
	Ortalama Hız U [m/s]	6.52	4.60	4.04	3.19	2.16
	Güç Yoğunluğu E [W/m^2]	482	206	133	64	18
50 m	Weibull A [m/s]	8.53	6.97	6.42	5.58	4.65
	Weibull k	1.53	1.46	1.48	1.48	1.54
	Ortalama Hız U [m/s]	7.68	6.31	5.81	5.05	4.18
	Güç Yoğunluğu E [W/m^2]	734	436	333	218	117
100 m	Weibull A [m/s]	9.28	8.3	7.68	6.79	5.87
	Weibull k	1.6	1.65	1.65	1.63	1.68
	Ortalama Hız U [m/s]	8.32	7.42	6.87	6.08	5.24
	Güç Yoğunluğu E [W/m^2]	873	593	472	332	204
150 m	Weibull A [m/s]	9.76	9.32	8.58	7.72	6.6
	Weibull k	1.59	1.74	1.75	1.71	1.67
	Ortalama Hız U [m/s]	8.76	8.31	7.64	6.88	5.89
	Güç Yoğunluğu E [W/m^2]	1031	780	604	455	294
200 m	Weibull A [m/s]	9.89	10.05	9.27	8.33	7.2
	Weibull k	1.55	1.77	1.78	1.72	1.68
	Ortalama Hız U [m/s]	8.9	8.94	8.25	7.43	6.43
	Güç Yoğunluğu E [W/m^2]	1119	957	745	569	377

Bölgenin rüzgâr rejimindeki olası değişiklikler, satın alınacak rüzgâr türbininin kapasite faktörü (bu değer yükselirse, kayıplar azalacak ve amortisman süresi kısalacaktır) ve bakım maliyetleri ihmal edildiğinde Afyonkarahisar için 1 MW rüzgâr güç santrali için amortisman süresi döviz kuruna bağlı olarak yaklaşık 15 yıl olarak hesaplanmaktadır. Bu değer alınacak yenilenebilir enerji teşvikleriyle ve teknolojik gelişmelerle kısalacaktır. Önceki yıllarda, döviz kuruna ve teşviklere bağlı olarak bu değer çok daha düşük seviyelerdeyken, günümüzde amortisman süresinin uzadığı görülmektedir.

5.2 Üretim karşılaştırması

WAsP programı tarafından 1MW rüzgâr türbini için 2.484 GWh olarak (gigawatt-saat) olarak hesaplanan değer mevcut RES'lerin yıllık üretim değerleri ve literatürdeki benzer çalışmalarda WAsP ile üretilen değerlerle karşılaştırıldığı çizelge, Tablo 3'te sunulmuştur. Halihazırda aktif olarak çalışan santral değerleriyle karşılaştırıldığında, oldukça yakın değerler elde edildiği görülmektedir.

Tablo 3. WAsP ile üretilen değerlerin karşılaştırılması.

Table 3. Comparison of values produced by WAsP.

Çalışma	Türbin Üreticisi	Kurulu Güç (MW)	Yıllık Toplam Üretim (GWh)	1 MW Başına Düşen Üretim
Afyon, Türkiye – WasP	Bonus	1	2.484	2.484
Kocatepe RES	Siemens	88	205	2.33
Eber RES	Nordex	39	132	2.13
Dehmas et. al. [45], Cezayir- WAsP	Bonus	2	4.56	2.28
Oner et. al [46], Çanakkale, Türkiye - WAsP	Bonus	4.8	12.84	2.68

6 Rüzgâr enerji santrallerinin sosyopolitik etkileri

Enerji sistemleri, yalnızca ekonomik ve teknik açıdan değil, aynı zamanda toplumla etkileşimi, doğaya etkileri açısından da değerlendirilmelidir. Bu noktada, yenilenebilir enerji konusunda yerel toplumun bilgi ve farkındalığının artırılması gerekmektedir. Eğitim programları ve bilgilendirme faaliyetleri, yenilenebilir enerjiye olan destek ve kabulü artırabilir görülmektedir. Bu yatırımların, bölgedeki ekonomik kalkınmayı teşvik edeceği konusunda bilgilendirmeler yapmak gerekmektedir. Enerji santrallerinde yerel halkın istihdam edilmesi ve yerel tedarikçi ağlarının oluşturulması bölgesel ekonomik büyümeye katkı sağlamaktadır. Afyonkarahsiar özelinde düşünüldüğünde, özellikle Sandıklı, Emirdağ ve Bolvadin gibi açık alanların yoğun olduğu ilçelerde, rüzgâr enerjisi potansiyelinin artan çalışmalarla birlikte daha fazla kullanılabilir hale gelmesi beklenmekte, bölgede istihdamı artırmaktadır.

Her ne kadar "Temiz Enerji" olarak isimlendirilseler de, yenilenebilir enerji sistemleri dahil hiçbir enerji kaynağı %100 temiz ve doğaya tamamen zararsız değildir. Çalışması esnasında karbon salınımı yapmıyor olmaları, rüzgâr türbinlerinin doğaya tamamen zararsız olduğunu göstermemektedir. Kuşların göç yollarına zarar vermekte, özellikle yarasa ve arı popülasyonlarını etkilemekte, hareketlerinin titreşim, gürültü ve gölgeleriyle bazı hayvanlarda (özellikle meralarda otlatılan sürü hayvanlarında) strese neden olmaktadır. Bu durum dolayısıyla insanı da etkilemektedir. Yenilenebilir enerji projelerinin doğru planlanması ve yönetilmesi, çevresel etkilerin en aza indirilmesini sağlayabilir. Doğru politika ve yönetişim ile, sürdürülebilir kalkınma hedefleri desteklenmelidir.

Yenilenebilir enerji projelerinin yerel toplum tarafından kabul edilmesi önemlidir. Toplumun projelerde aktif rol alması ve yerel ihtiyaçların dikkate alınması, sosyal uyum ve projenin uzun vadeli başarısı için kritik öneme sahiptir.

6.1 İstihdam ve ekonomik gelişme

Afyonkarahisar'daki rüzgâr enerji santrali projeleri, özellikle inşaat ve kurulum aşamalarında büyük bir iş gücü ihtiyacı oluşturmaktadır. İnşaat sektörüne bağlı olarak çalışan yerel işgücü, proje sürecinde etkin rol oynarken, santrallerin işletme

aşamasında teknik uzmanlar, enerji mühendisleri ve bakım personeli için uzun vadeli istihdam olanakları oluşmaktadır.

Rüzgâr enerji santrali yatırımları, sadece enerji üretimi ile sınırlı kalmayarak, yerel işletmelere ve esnafa da önemli bir katkı sağlamaktadır. İnşaat ve işletme süreçlerinde kullanılan malzemeler, lojistik ve nakliye gibi hizmetlerin bölge içinden sağlanması yerel ekonomiyi desteklemekte, bölge esnafı ve ticaret hacmi canlanmaktadır. Aynı zamanda, bölgede oluşan iş imkanları sayesinde hane halkının gelirinde artış meydana gelmekte, böylece ekonomik büyüme hızlanmaktadır.

6.2 Çevresel etkiler

Fosil yakıtlara alternatif olarak yenilenebilir enerji kaynaklarının tercih edilmesi, karbon emisyonlarını azaltarak iklim değişikliğine karşı sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır. Rüzgâr enerji santralleri, karbon salınımı yapmadan enerji üretimi sağladığı için bölgedeki toplam karbon ayak izini ciddi oranda düşürmekte, hava kalitesinin korunmasına katkıda bulunmaktadır. Bu durum, bölge genelinde daha sağlıklı bir çevre yaratırken, aynı zamanda uzun vadede iklim krizinin etkilerini azaltma potansiyeli taşımaktadır.

Yenilenebilir enerji projelerinin görünürlüğü, bölgedeki bireyler arasında çevre bilincini artırmakta, sürdürülebilirlik kavramının toplumda daha geniş bir yer bulmasını sağlamaktadır. Özellikle genç nesil arasında çevre dostu enerji kaynaklarının tercih edilmesi, bölge halkının da bu konuda farkındalığını yükselterek, çevresel sürdürülebilirliğe yönelik toplumsal destek sağlamaktadır.

6.3 Toplumsal kabul ve direnç

Çevre dostu enerji kaynaklarının bölgeye kazandırılması, toplum genelinde olumlu bir algı yaratmakta ve bölgenin modern enerji politikalarına entegrasyonunu desteklemektedir. Çevreye duyarlı bireyler, yenilenebilir enerji projelerinin uzun vadede çevreyi koruyan ve doğal kaynakları sürdürülebilir bir şekilde kullanmayı hedefleyen bir yaklaşım olduğunun farkında olup, bu projelere pozitif yaklaşmaktadır.

Ancak bazı durumlarda, rüzgâr enerji santrallerinin planlanması ve kurulumu yerel halk arasında dirençle karşılanmaktadır. Özellikle santrallerin yerleşim yerlerine yakın konumlandırılması veya doğal yaşam alanlarını etkilemesi, projelere karşı olumsuz bir tepki oluşturabilir.

Özellikle, Emirdağ ve Bayat gibi hayvancılığın yoğun olduğu ilçelerde, rüzgâr türbinlerinin hayvan davranışları üzerindeki etkileri konusunda çekinceler dile getirilmektedir.

Bölge halkı, biyolojik çeşitliliğin korunması ve yaşam kalitesinin devamı için santrallerin daha dikkatli planlanmasını talep etmekte, projelerin çevreye olumsuz etkilerini azaltacak önlemlerin alınmasını istemektedir. Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) sürecinde yaşanan problemler ise projelerin gecikmesine ya da iptal edilmesine neden olabilmektedir.

Afyonkarahisar, Türkiye'nin iç bölgelerinde yer almakta olup, belirli kuş göç yolları üzerinde bulunmaktadır. Bölgedeki rüzgâr enerjisi projelerinin planlanması sırasında, kuş göç yolları ve arıcılık faaliyetleri dikkate alınmalıdır. Özellikle, türbinlerin konumlandırılması ve yüksekliği, kuşların ve arıların doğal hareketlerini en az etkileyecek şekilde tasarlanmalıdır.

7 Tartışma ve sonuç

Bu çalışmada, Afyonkarahisar ilinin rüzgâr enerji potansiyeli, TR33 bölgesindeki diğer iller olan Kütahya, Uşak ve Manisa ile karşılaştırılmış ve bölgesel yenilenebilir enerji yatırımlarının uygulanabilirliği değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, Afyonkarahisar'ın coğrafi ve meteorolojik koşullarının rüzgâr enerjisi üretimi için uygun olduğunu göstermektedir. Özellikle, kurulu rüzgâr enerjisi kapasitesinin sürekli artması, bölgenin Türkiye'nin enerji hedeflerine ulaşma sürecinde önemli bir rol oynayabileceğini ortaya koymaktadır.

Rüzgâr güç yoğunluğu ve rüzgâr hızlarına dayalı yapılan simülasyonlar, Afyonkarahisar'ın TR33 bölgesindeki diğer illerle karşılaştırıldığında oldukça rekabetçi bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Kütahya, Uşak ve Manisa da rüzgâr enerjisi açısından uygun koşullara sahip olmakla birlikte, Afyonkarahisar'ın Kütahya ve Uşak'tan daha fazla yatırım çekmesi, bölgesel kalkınmayı hızlandırma açısından önemli bir fırsat sunmaktadır. TR33 bölgesi içerisinde en yüksek potansiyelin Manisa'da olduğu görülmektedir. Çalışmanın bulguları, TR33 bölgesinde enerji yatırımlarının daha dengeli ve stratejik bir şekilde planlanması gerektiğini vurgulamaktadır.

Bununla birlikte, rüzgâr enerji santrallerinin bölgenin çevresel ve ekonomik yapısına olan etkileri de tartışılmalıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları, çevresel sürdürülebilirlik açısından olumlu sonuçlar doğurmasına rağmen, yerel ekosistemler ve biyoçeşitlilik üzerindeki potansiyel olumsuz etkiler göz ardı edilmemelidir. Bu nedenle, bölgedeki enerji yatırımlarının çevreyle uyumlu bir şekilde gerçekleştirilmesi için stratejiler geliştirilmelidir.

Ayrıca, çalışmanın literatüre katkıları değerlendirildiğinde, rüzgâr enerjisinin Türkiye'nin enerji politikalarında ne kadar stratejik bir konumda olduğunun altı çizilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılan yatırımların artmasıyla birlikte, rüzgâr enerjisinin önemi daha da belirgin hale gelmektedir. Çalışma, yerel enerji politikalarının planlanması ve enerji yatırımlarının optimize edilmesi konularında literatüre önemli bir katkı sunmaktadır.

Çalışma, Afyonkarahisar'ın rüzgâr enerji potansiyelini analiz ederek WAsP yazılımıyla örnek bir fizibilite çalışması perspektifi sunmuştur. Yapılan simülasyonlar ve analizler, bölgenin rüzgâr enerjisi açısından önemli bir potansiyele sahip olduğunu doğrulamıştır. 1 MW gücündeki ortalama bir rüzgâr türbininin, halihazırdaki politikalar ile yaklaşık 15 yıl gibi bir geri dönüş (amortisman) süresi olduğu hesaplanmıştır. Afyonkarahisar, Türkiye'nin gelecek enerji hedeflerine ulaşmasında önemli bir rol üstlenebilir ve yenilenebilir enerji alanında yapılan yatırımların artırılması bölgesel kalkınmaya katkı sağlayabilir bir konumdadır. Ayrıca, çalışma, rüzgâr enerjisi yatırımlarının sadece enerji üretimi açısından değil, aynı zamanda bölgesel kalkınma, ekonomik büyüme ve çevresel sürdürülebilirlik açısından da dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Bu kapsamda, politika yapıcıların ve yatırımcıların enerji yatırımlarını planlarken çevresel faktörleri göz önünde bulundurması büyük önem taşımaktadır.

Gelecekteki araştırmalar, Afyonkarahisar gibi bölgelerde yenilenebilir enerji yatırımlarının daha detaylı çevresel analizlerle desteklenmesi ve enerji üretim sistemlerinin daha verimli hale getirilmesine odaklanabilir. Ayrıca, hibrit enerji sistemlerinin kullanımı ve enerji depolama çözümleri gibi yenilikçi yaklaşımlar da değerlendirilebilir.

8 Discussion and conclusion

In this study, the wind energy potential of Afyonkarahisar province was compared with other provinces in the TR33 region, namely Kütahya, Uşak, and Manisa, and the feasibility of regional renewable energy investments was evaluated. The findings show that Afyonkarahisar's geographical and meteorological conditions are suitable for wind energy production. In particular, the continuous increase in the installed wind energy capacity reveals that the region can play an essential role in achieving Turkey's energy goals. Simulations based on wind Güç yoğunluğu and wind speeds show that Afyonkarahisar has a highly competitive potential compared to other provinces in the TR33 region. Kütahya, Uşak, and Manisa also have suitable conditions in terms of wind energy, and the fact that Afyonkarahisar attracts more investments than Kütahya and Uşak offers an essential opportunity in terms of accelerating regional development. It is observed that the highest potential in the TR33 region is in Manisa. The study's findings emphasize that energy investments in the TR33 region should be planned more balanced and strategically. However, the effects of wind power plants on the environmental and economic structure of the region should also be discussed. Although renewable energy sources have positive results in terms of environmental sustainability, their potential adverse effects on local ecosystems and biodiversity should not be ignored. Therefore, strategies should be developed to ensure that energy investments in the region are carried out in an environmentally compatible manner.

In addition, when the study's contributions to the literature are evaluated, it is emphasized how strategic wind energy is in Turkey's energy policies. With the increase in investments in renewable energy sources, the importance of wind energy becomes even more evident. The study contributes to the literature on planning local energy policies and optimizing energy investments.

The study analyzed the wind energy potential of Afyonkarahisar and presented a sample feasibility study perspective with the WAsP software. The simulations and analyses confirmed that the region has significant potential in terms of wind energy. It was calculated that an average wind turbine with a power of 1 MW has a payback period of approximately 15 years with current policies. Afyonkarahisar can play an important role in Turkey's future energy goals and is in a position to contribute to regional development by increasing investments in renewable energy.

In addition, the study emphasizes that wind energy investments should be considered in terms of energy production and regional development, economic growth, and environmental sustainability. In this context, policymakers and investors must consider environmental factors when planning energy investments.

Future research can focus on supporting renewable energy investments in regions such as Afyonkarahisar with more detailed environmental analyses and making energy production systems more efficient. In addition, innovative approaches, such as using hybrid energy systems and energy storage solutions, can be evaluated.

9 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Fatih Serttaş, tek yazar olarak fikrin oluşması, tasarımın yapılması ve literatür taramasının gerçekleştirilmesi, WAsP programıyla simülasyonların yapılması, sonuçların elde edilerek değerlendirilmesi aşamalarının tamamını kendisi yürütmüştür.

10 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur".

"Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır".

11 Kaynaklar

[1] Ayar B, Yalçın ZG, Dağ M. "Rüzgârı hasat etmek: Türkiye'de rüzgâr enerjisinin fizibilitesi ve gelişmeleri üzerine bir araştırma". *European Journal of Science and Technology*, 49,43-49, 2023.

[2] Ata R. "Akhisar bölgesi için ortalama rüzgâr hızlarına bağlı rüzgâr esme sürelerinin yapay sinir ağları ile tahmini". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20, 162-165, 2014.

[3] Güngör A. "Batı Anadolu rüzgâr karakteristikleri üzerine yapılan çalışmaların değerlendirilmesi". *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1(2), 41-49, 2016.

[4] Demirbaş A. "Competition Potential of Wind Power Plants". *Energy Sources*, 27(7), 605–612, 2005.

[5] Ilkılıç C. "Wind energy and assessment of wind energy potential in Turkey". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2), 1165–1173, 2012.

[6] Arıkan O, İşen E, Kekezoğlu B. "Performance analysis of stand-alone hybrid (wind-photovoltaic) energy system". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(5), 571–576, 2019.

[7] Dawood K. "Hybrid wind-solar reliable solution for Turkey to meet electric demand". *Balkan Journal of Electrical & Computer Engineering*, 4(2), 62-66, 2016.

[8] Başoğlu ME, Çakır B. "Wind Energy Status in Turkey". *International Journal of Environmental, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, 9(1), 19–24, 2015.

[9] Şenel B, Şenel M, Bilir L. "Role of wind power in the energy policy of Turkey". *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 9(1), 69–75, 2014.

[10] Gökçöl C, Uğurlu A. "Current situation of wind energy in Turkey and assessment of Yalova's wind energy potential". *Electronic Journal of Vocational Colleges*, 6(3), 49–59, 2016.

[11] Bilir L, İmir M, Devrim Y, Albostan A. "An investigation on wind energy potential and small scale wind turbine performance at İncek region-Ankara, Turkey". *Energy Conversion and Management*, 103, 910–923, 2015.

[12] Kaplan Y. "Overview of wind energy in the world and assessment of current wind energy policies in Turkey". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 562–568, 2015.

[13] Çelik A. "Review of Turkey's current energy status: A case study for wind energy potential of Çanakkale province". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 2743–2749, 2011.

[14] Navalkar S, Dell T, Burillo N. "Wake steering for wind turbine fatigue load optimisation". *American Control Conference (ACC)*, San Diego, CA, USA, 31 May–2 June 2023.

[15] Maus J, Peinke J, Hölling M. "Experimental investigation on the effect of lateral turbine spacing on interactions of wakes". *Journal of Physics: Conference Series*, 2263, 012031, 2022.

[16] Dou B, Guala M, Lei L, Zeng P. "Experimental investigation of the performance and wake effect of a small-scale wind turbine in a wind tunnel". *Energy*, 167, 25–35, 2019.
[17] Kim S, Shin H, Joo YC, Kim K. "A study of the wake effects on the wind characteristics and fatigue loads for the turbines in a wind farm". *Renewable Energy*, 76, 219–230, 2015.
[18] Adaramola MS, Krogstad PÅ. "Experimental investigation of wake effects on wind turbine performance". *Renewable Energy*, 36(9), 2450–2458, 2011.
[19] Ackermann T. *Wind Power in Power Systems*. Chichester, UK, John Wiley & Sons, 2005.
[20] Global Wind Atlas. "Global Wind Atlas". globalwindatlas.info, (23.09.2025).
[21] Resmî Gazete. "01.05.2023 Tarihli Resmî Gazete". https://www.resmigazete.gov.tr (23.09.2025).
[22] Dayı F, Yücel M, Demirkol Z, Cilesiz A. "Management of sustainable investments: A comprehensive financial evaluation of wind energy facilities in Kastamonu". *Energy for Sustainable Development*, 81(1), 101501, 2024.
[23] Yıldız C, Şekkeli M. "Çekirdek yoğunluk kestirimi yönteminin rüzgâr türbini performans testinde kullanılması". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(5), 899–907, 2020.
[24] Kurban M, Hocaoğlu FO, Kantar YM. "Rüzgâr enerjisi potansiyelinin tahmininde kullanılan iki farklı istatistiksel dağılımın karşılaştırmalı analizi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(1), 103–109, 2007.
[25] Al-Busaidi A, Al-Mawali A, Kazem HA. "Wind energy potential assessment and feasibility study for a coastal site in Oman". *Energy Conversion and Management*, 243, 114421, 2021.
[26] Hamidat A, Benatiallah S, Boualit M. "Techno-economic feasibility study of a hybrid renewable energy system for a remote area in Algeria". *Renewable Energy*, 150, 794–806, 2020.
[27] Liu Y, Wang X, Li C. "Wind resource assessment and feasibility study of offshore wind farm in the Bohai Sea, China". *Ocean Engineering*, 246, 110548, 2022.
[28] Wolske KS, Markard J, Wüstenhagen R. "Social acceptance of wind energy: A comparative study between Germany and Denmark". *Energy Policy*, 154, 112304, 2021.
[29] Camacho A, Baker E, O'Leary M. "Community benefits and social acceptance of wind energy projects: Evidence from the United States". *Journal of Environmental Management*, 270, 110884, 2020.
[30] Truong NTA. "Feasibility analysis of wind power plant in South East Region, Vietnam". *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(4), 15779–15783, 2024.
[31] Reutter K, Flay RGJ, McIntosh EM. "An application of the wasp program in complex, forested terrain as part of a wind farm feasibility study". *Wind Engineering*, 29(6), 491–502, 2005.
[32] Ghimire M, Shrestha R, Karki R, Sharma S. "Wind energy resource assessment and feasibility study of wind farm in Mustang". *Journal of the Institute of Engineering*, 8(1-2),93-106, 2011.
[33] Malik A, Kuba C. "Power generation expansion planning including large scale wind integration: A case study of Oman". *Journal of Wind Energy*, 1, 1-7, 2013.
[34] Sveinbjörnsson S. Analysis of WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) in Complex Topographical Conditions Using Measured Production from a Large Scale Wind Farm. Master's Thesis, University of Washington, Seattle, USA, 2013.
[35] Shanu S, Mahshid N, Putti S, Rao C. "Wind resource assessment and techno-economic analysis using WAsP software-a case study". *IEEE Technology & Engineering Management Conference – Asia Pacific (TEMSCON-ASPAC)*, Bengaluru, India, 14–16 December 2023.
[36] [36] Yılmaz U, Balo F, Sua LS. "Simulation framework for wind energy attributes with WAsP". *Procedia Computer Science*, 158, 458–465, 2019.
[37] Hadi FA, Ibrahim N, Musa S, Abdulkadir M, Alhassan A. "Pre-feasibility study of hypothetical wind energy project using simulated and measured data". *2nd International Conference for Engineering, Technology and Sciences of Al-Kitab (ICETS)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 04-06 December 2018.
[38] Himri Y, Haddadi A, Ferchichi H, Besbes R. "Potential and economic feasibility of wind energy in south-west region of Algeria". *Sustainable Energy Technologies and Assessments,* 38, 100643, 2020.
[39] Khan T, Taweekun J, Theppaya T. "Determination of feasible sites for wind farm using WAsP in Uttaradit, Thailand". *International Conference on Engineering and Technology (ICET 2021)*, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1163, 012008, 2021.
[40] Schenk K, Gelanoure J, Davies M, Thomas P. "Incorporation and impact of a wind energy conversion system in generation expansion planning". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-100(3), 1189–1196, 1981.
[41] Meziane F, Halimi N, Boukli Hacène F, Kasbadji Merzouk N, Merzouk M, Mahmoudi H. "Wind flow simulation and characteristics prediction using WAsP software for energy planning over the region of Hassi R'Mel". *International Journal of Green Energy*, 18(1), 1-11, 2021.
[42] Hadi FA, Rana A, Emmanuel-Otto J, Ivan D. "An economic study of a wind energy project using different sources of wind data". *International Journal of Renewable Energy Research*,61(2), 322-332, 2020.
[43] Kamdar I, Singh P, Singh R. "Wind farm site selection using WAsP tool for application in the tropical region". *Sustainability*, 13(5), 2713, 2021.
[44] Bagočius V, Zavadskas EK, Turskis Z. "Multi-person selection of the best wind turbine based on the multi-criteria integrated additive-multiplicative utility function". *Journal of Civil Engineering and Management*, 20(4), 590-599, 2014.
[45] Abdeslame Dehmas D, Kherba N, Boukli Hacene F, Kasbadji Merzouk N, Merzouk M, Mahmoudi H, Goosen MFA. "On the use of wind energy to power reverse osmosis desalination plant: A case study from Ténès (Algeria)". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2), 956–963, 2011.
[46] Öner Y, Özcıra S, Bekiroğlu N, Şenol İ. "A comparative analysis of wind power density prediction methods for Çanakkale, Intepe region, Turkey". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 491–502, 2013.

Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 31(7), 1255-1267, 2025

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

A stable and fast PSO algorithm guided by SPSA for vector quantization-based image compression

Vector nicemleme tabanlı görüntü sıkıştırma için EPSY ile yönlendirilen kararlı ve hızlı bir PSO algoritması

İlker Kılıç[1*], *Haldun Sarnel*[1]

[1]Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Manisa Celal Bayar University, Manisa, Türkiye.

ilker.kilic@cbu.edu.tr, haldun.sarnel@cbu.edu.tr

Received/Geliş Tarihi: 17.10.2024 Revision/Düzeltme Tarihi: 25.02.2025 doi: 10.5505/pajes.2025.78006

Accepted/Kabul Tarihi: 24.04.2025 Research Article/Araştırma Makalesi

Abstract

Image compression plays a crucial role in reducing storage requirements and improving transmission efficiency. The effectiveness of lossy image compression using vector quantization (VQ) heavily depends on the quality of codebook generation, which is inherently an optimization problem. In this paper, a coupled hybrid algorithm integrating Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation (SPSA) into Particle Swarm Optimization (PSO) is proposed to enhance both the convergence speed and codebook quality in vector quantization. The novel SPSA-FPSO algorithm, by generating multiple alternative codebooks at each iteration and selecting the best, successfully avoids local minima and achieves faster convergence. Experimental results, conducted on standard gray-level images of various contrast levels, demonstrate that the proposed SPSA-FPSO algorithm outperforms both basic PSO and SPSA algorithms in terms of lower mean square error (MSE) and higher convergence speeds, establishing its superiority for VQ-based image compression tasks. This superiority is also shown to be valid when compared to other metaheuristic algorithms.

Keywords: Image compression, Metaheuristic algorithms, Vector Quantization, Codebook generation, PSO, SPSA.

Öz

Görüntü sıkıştırma, depolama gereksinimlerini azaltmak ve iletim verimliliğini artırmak açısından büyük bir öneme sahiptir. Vektör nicemleme (VN) tabanlı kayıplı görüntü sıkıştırmanın başarısı, esasen bir optimizasyon problemi olan kod tablosu üretiminin kalitesine bağlıdır. Bu makalede, hem algoritmanın yakınsama hızını hem de VN kod tablosunun kalitesini artırmak için Eşzamanlı Pertürbasyon Stokastik Yaklaşımı (EPSY) tekniğini Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ile bütünleştiren hibrit bir algoritma önerilmektedir. Önerilen EPSY-HPSO algoritması, her iterasyonda birden fazla alternatif kod kitabı üreterek en iyisini seçmekte ve yerel minimum noktalarından kaçınarak daha hızlı bir yakınsama sağlamaktadır. Farklı kontrast seviyelerine sahip standart gri seviye görüntüler üzerinde gerçekleştirilen deneysel sonuçlar, EPSY-HPSO algoritmasının hem ortalama kare hata (OKH) değerlerini düşürme hem de daha yüksek yakınsama hızları açısından klasik PSO ve EPSY algoritmalarından daha başarılı olduğunu göstererek VN tabanlı görüntü sıkıştırmadaki üstünlüğünü kanıtlamaktadır. Bu üstünlüğün diğer metasezgisel algoritmalarla karşılaştırıldığında da geçerli olduğu gösterilmektedir.

Anahtar kelimeler: Görüntü sıkıştırma, Metasezgisel algoritmalar, Vektör Nicemleme, Kod tablosu üretimi, PSO, EPSY.

1 Introduction

Digital image compression is a process which aims at reducing the size of a digital image for both storage and transmission purposes. Compressed images require less information storage capacity on storage devices, while allowing lower bandwidth and less time duration to transmit them over a communication channel. With the help of digital image compression algorithms, all digital devices using image data are today able to handle high-resolution large-size digital images in a more efficient manner.

Vector quantization (VQ) [1],[2] is a widely used quantization technique in lossy signal processing, information classification, pattern recognition and feature extraction. In lossy image compression, small image blocks in a whole image are grouped based on their similarity. The VQ algorithm reduces the image size by mapping blocks in an image into a set of vectors. In implementation, after the division of the image into small blocks, each block is converted to a vector. Similar vectors form a cluster centered at a codeword vector. All codeword vectors of the image form a list called codebook. All image vectors are assigned to the codeword, which is the most similar in the codebook, and represented by their addresses in the codebook instead of the vector itself. Therefore, a compression is obtained, and the image size is reduced. The codebook including a number of codewords must be estimated to represent the entire image as close to its original as possible.

Better codebook estimation is a crucial task for improving the performance and efficiency of the image compression algorithms. Usually, arithmetic coding and Huffman algorithm [3] are opted for a lossless image compression process. However, arithmetic coding necessitates extensive probability distribution tables to define symbol codes, and the frequency-based code definitions in Huffman coding significantly impact compression efficiency. Due to these limitations, alternative lossy compression techniques have become more popular and achieve higher compression ratios. In VQ-based compression methods, codebook estimation has a great effect on the performance [4]. Here, better grouping the image blocks directly decreases the error of the reconstructed image. Therefore, finding the optimal codebook can be viewed as an optimization problem. Codebook optimization increases the quality of the reconstructed image at the same compression ratios. The use of metaheuristics for codebook generation has

*Corresponding author/Yazışılan Yazar

become more popular recently. The goal of those optimization algorithms is to find better individuals for representing the optimum codebook. There are many metaheuristic methods in the literature presented to solve the codebook estimation problem in VQ. Some of them are genetic algorithm [5], cuckoo search algorithm [6], ant colony optimization [7], particle swarm optimization [8], firefly optimization algorithm [9], bat algorithm [10], lion optimization algorithm [11], flower pollination algorithm [12], whale optimization algorithm [13], and crow search algorithm [14]. There are also some metaheuristic methods enhanced by useful techniques to increase their performances for optimal codebook estimation such as improved differential evaluation algorithm [15], improved sine–cosine algorithm [16], improved adolescent identity search algorithm [17], smart fruit fly optimization algorithm [18] and Levy flight based bat algorithm [19]. A can finally be added to A new Some of these metaheuristic optimization algorithms use the K-Means technique to find initial codebooks before starting the main optimization process.

Simultaneous perturbation stochastic approximation (SPSA) is an optimization algorithm developed for difficult multivariate optimization problems [20]. The gradient approximation of an optimization problem is the primary benefit of the SPSA. The algorithm needs only two evaluations of the objective function per iteration to estimate the unknown parameters regardless of the dimension of the optimization problem. Therefore, the SPSA has a superior performance for estimating the gradient value without direct gradient information. This property makes it favourable to use in many optimization problems including signal and image processing, feedback control, statistical parameter estimation, and simulation-based optimization.

Particle swarm optimization (PSO) is a population (or swarm) based optimization algorithm using stochastic search. It was inspired by the social behavior of animals and relies on the assumption that social exchange of information among individuals could lead to evolutionary distinction. Each particle in the swarm represents an individual of the population. PSO is one of the best known and commonly used meta-heuristic algorithms. But it has two major drawbacks. First, the basic algorithm has a relatively slow progress towards optimal or near optimal solutions, especially when the problem domain has a search space of high dimension. Moreover, the position update strategy of the particles, that depends strongly on the global best (*gbest*) particle, has also adverse effects on the algorithm performance. In PSO, *gbest* inherently guides the rest of the swarm. Unfortunately, this causes the swarm to become more similar to this guiding particle, bringing with it some loss of diversity in the search space. It is exactly this phenomenon that increases the probability of premature convergence and getting trapped in local minima. To avoid these drawbacks and improve the overall performance of the PSO algorithm, many hybrid schemes are proposed in the literature. Some examples of such schemes are given as follows. Chen *et al*. [21] propose a local search method based on the conjugate gradient in combination with the PSO for the identification of nonlinear systems. A hybrid PSO and ant colony optimization [22] is proposed to solve the problem of designing truss structures. A quasi-Newton sequential quadratic programming method for local search is combined with the PSO algorithm in [23] to solve structural optimization problems. Cherki *et al.* [24] use a sequential combination of GA and PSO to solve the problem of the optimal power flow on electrical networks. Seyedpoora *et al.* [25] propose a preliminary optimization using SPSA followed by PSO. In their scheme, many copies of the result provided by SPSA are appended to the usual randomized initial swarm for the PSO algorithm. This process produces an efficient hybrid initial swarm. Therein it is shown that their hybrid algorithm performs well in solving structural optimization problems. In another study [26], combining PSO with gradient-based methods for optimizing convolutional neural networks is explored. Following some performance comparisons in their research, the results come out generally in favor of conventional gradient-based methods rather than the hybridization of PSO.

The hybrid algorithms given above combine two among many optimization algorithms in a way to apply them sequentially and are classified in a decoupled hybridization type. Alternatively, the PSO has been hybridized with several popular metaheuristics and mathematical solvers such as gradient-oriented schemes [27] in a coupled way. Hybridization with the genetic algorithm [28], the differential evolution algorithm [29], the harmony search algorithm [30], the sine–cosine algorithm [31], the gray wolf algorithm [32], the firefly algorithm [33], and finally both whale and differential evolution algorithms (multiple hybridization) [34] can be given as some other examples of the second type. It appears that more research focuses on the coupled hybridization because its designs significantly affect the performance of the base algorithms. As a result, its implementations have shown enhancements in the quality of the optimization results.

Another coupled hybridization of PSO to avoid its drawbacks is given by Kiranyaz et al. [35]. They propose two algorithms in which SPSA is embedded inside PSO to guide the swarm. They use a generic name *stochastic approximation driven* PSO (SAD PSO) for their algorithms. In their first algorithm, *gbest* is updated (or guided) only by SPSA with the ability for gradient estimation of the objective function while other particles are updated as usual at every PSO iteration. Their second algorithm utilizes the information of a special particle which is not in the swarm, so-called alternative global best particle. The position of this particle is computed by guiding *gbest* with SPSA. The decision is made based on a competition between the two. The winner replaces the particle *gbest* to provide better guidance to the swarm in the next iteration.

The use of metaheuristic methods for VQ-based image compression has been limited to the use of base algorithms alone. With a single base algorithm, the optimum codebook estimation process can get stuck at local optima, resulting in compressed images with worse visual quality than the optimum level. Even in cases where local optima can be escaped from, the number of iterations required to reach the global optimum is quite large, overshadowing the practical importance of the algorithm for codebook optimization. The motivation of this work is to improve the accuracy and speed performance of a metaheuristic method for the codebook estimation problem by using a hybridization approach. PSO was chosen as the metaheuristic base algorithm since it is a well-known optimization algorithm. The inspiration for developing our optimization algorithm is the second SAD PSO algorithm in [35]. Although their hybrid algorithm provided performance improvement over PSO, it can be further improved in terms of the quality of the guidance given by SPSA for both increasing diversity in the search space and speeding up the convergence. In this paper, we first propose an extended algorithm. The proposed algorithm computes multiple SPSA

gradient approximations instead of one per iteration and selects the best one to find a better next position (codebook) for *gbest*. This extension can also be stated as using multiple alternative global particles instead of one in the previous algorithm. Additionally, the gain parameter a of the SPSA algorithm is increased dynamically through the iterations in the proposed algorithm. This novelty results in further performance increase. The proposed extended algorithm will be referred to as SPSA-*driven fast* PSO (SPSA-FPSO) from here on to emphasize the guidance role of SPSA in the basic PSO and the acceleration provided in the convergence speed. Second major contribution of this work is the presentation and discussion of the results obtained from the first-time application of this high performance algorithm to codebook estimation in VQ-based image compression. Unlike the PSO algorithm's frequent result of getting trapped in local optima, the proposed SPSA-FPSO algorithm is capable of escaping from local optima and always reaches or approximates the global optimum.

This paper is organized as follows. Section 2 introduces the K-Means algorithm for VQ, the basic PSO algorithm, and the SPSA algorithm. The proposed algorithm and its application to image compression based on VQ are presented in Section 3. The experimental results over mean square error (MSE) minimization between the reconstructed images and the originals are given in Section 4. Finally, Section 5 provides a summary of the concluding remarks.

2 Related methods

In this section, the K-Means algorithm for VQ that produces initial codebooks for all optimization algorithms, the PSO algorithm and the SPSA algorithm are explained, respectively, in detail.

2.1 K-Means algorithm for vector quantization

The K-Means algorithm is a plain and well-known clustering technique used in many application areas including Vector Quantization. The algorithm aims to partition the whole data into "k" Voronoi cells. K-Means algorithm can be used to cluster data vectors converted from small image blocks. It is one of the most favorite choices for generating codebooks in VQ due to its simplicity and fair image representation ability. The most common version of the K-Means technique is known as Lloyd-Forgy algorithm which begins by Forgy initialization [36],[37]. The initial codewords are selected randomly from the original image blocks by Lloyd-Forgy method. The technique aims to find an optimum codebook that consists of codeword vectors list representing the image data best. The K-Means technique starts its process by dividing the original input image into sub-blocks. Consider the original image $Y = \{X_{ij}\}$ comprises $N \times N$ pixels and is divided into sub-blocks of size $m \times m$ pixels. The number of sub-blocks is determined by $N_b = \left(\frac{N}{m} \times \frac{N}{m}\right)$. All image data is represented by a set of image vectors $\{X = x_i, i = 1,2, \dots, N_b\}$. Let the variable L represents the size of the blocks, where $L = m \times m$ pixels. Therefore, each sub-block x_i is defined within an L-dimensional Euclidean space, denoted as $x_i \in \Re_L$. Then, a codebook of N_c codewords, $C = \{c_1, c_2, \dots, c_{N_c}\}$, $c_j \in \Re_L$, $j = 1,2, \dots, N_c$ represents the original image. Each image vector is denoted as a row vector by $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{iL})$ and the j^{th} codeword in C is denoted by $c_j = (c_{j1}, c_{j2}, c_{j3}, \dots, c_{jL})$. The K-Means algorithm maps each original image block to a codeword by using minimum square error (MSE) criteria through a number of iterations. Once the algorithm finishes, the index number of the related codeword is used instead of the image block itself to represent the data in a block. Thus, a VQ-based image compression is achieved by forming the vectors of C that minimize the MSE value given in Equations (1)-(3).

$$\text{MSE(C)} = \frac{1}{N_b} \sum_{j=1}^{N_c} \sum_{i=1}^{N_b} \mu_{ij} \|x_i - c_j\|^2 \tag{1}$$

$$\sum_{J=1}^{N_c} \mu_{ij} = 1\,, \qquad i \in \{1, 2, \dots, N_b\} \tag{2}$$

$$\mu_{ij} = \begin{cases} 1\,, & \text{if } x_i \text{ is in the } j^{\text{th}} \text{ cluster} \\ 0\,, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{3}$$

The Euclidean distance D between the i^{th} image block and j^{th} codeword is defined by $\|x_i - c_j\|$.

The two rules specified by Equation (4) and Equation (5) are applied by the K-Means algorithm. The group of image vectors $(R_j, j = 1,2, \dots, N_c)$ must satisfy the distance condition

$$R_j \supset \{x \in X: D(x, c_j) < D(x, c_k), \forall k \neq j\}. \tag{4}$$

The center of R_j denoted by c_j is calculated using

$$c_j = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} x_i, \qquad x_i \in R_j \tag{5}$$

where N_j is the number of elements in R_j. Let the image vectors be x_i, $i = 1,2, \dots, N_b$ and the initial codewords determined by the Forgy method are $c_j(0)$, $j = 1,2, \dots, N_c$. Then, the K-Means algorithm applies the four steps given below to determine a suboptimal codebook that is used by an optimization algorithm.

Step 1: Select the number of N_c cluster centers from the original image blocks randomly. This process is named as Forgy method,

Step 2: Assign the original image blocks to the corresponding cluster center μ_{ij} using Euclidean distance criteria. The centers of clusters are saved in an indicator matrix with size of $N_b \times N_c$ pixels.

$$\mu_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } D\left(x_i, c_j(k)\right) = \min D\left(x_i, c_j(k)\right) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{6}$$

Step 3 : Calculate the new cluster centers given by Equation (4),

Step 4 : Execute the Equations (4) and (6) sequentially until the cluster centers of c_j do not change.

The codebook structure and image reconstruction are shown in Figure 1.

2.2 PSO algorithm

The Particle Swarm Optimization (PSO) is a population-based metaheuristic algorithm inspired by the social behavior of animals like birds flocking, fish schooling, and insect swarming. The PSO was introduced by Kennedy and Eberhart in 1995 [38]. It is simpler to implement than other metaheuristic and evolutionary algorithms and requires only a few parameters to be tuned. The PSO was modified by Shi and Eberhart [39] and applied to a broad spectrum of optimization problems [40].

All optimization problems require evaluations of their own objective functions by the solver algorithms to reach the global optimum solution of the unknown parameters in an iterative manner.

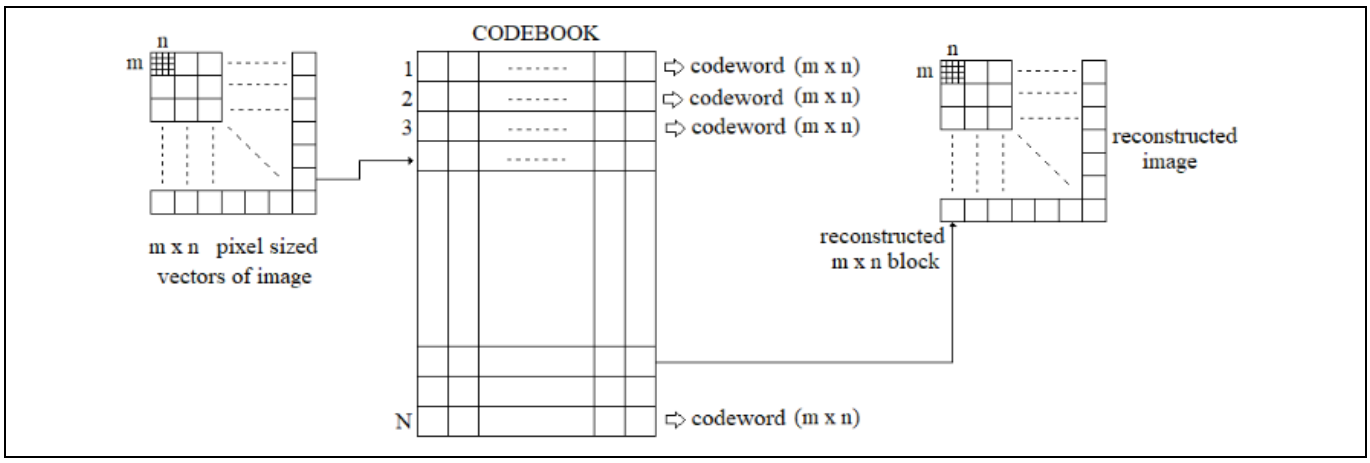


Figure 1. Original image blocks, codebook structure and reconstructed image structure of VQ [17].

An individual of the PSO algorithm is represented by a particle resembling for example, a migratory bird who has its own position and velocity in the swarm. The position of each particle is viewed as a potential solution to the optimization problem while its velocity indicates the distance it will move in the next iteration. Consequently, the velocity and position of each particle are updated after each iteration to adjust the parameters and achieve the global best position. The PSO algorithm inherently achieves both global and local searches. The best position of each particle in the swarm is denoted by PB^i $(i = 1,2, \dots, p)$ where *i* indicates the particle number and p is the size of the swarm. The best position of the population (that is of *gbest*) is denoted by GB that is recorded along the iterations. At the beginning, the position and velocity of each particle in the swarm are initialized to random values from the search space of the problem solution. In an iteration t, the PSO algorithm determines the direction of each particle in the swarm using the velocity and position equations expressed by Equations 7 and 8, respectively, where $t + 1$ points to the next iteration.

$$V_{t+1}^i = k_w V_t^i + k_p r_1 \left(PB_t^i - X_t^i\right) + k_g r_2 \left(GB_t - X_t^i\right) \quad (7)$$

$$X_{t+1}^i = X_t^i + V_{t+1}^i \quad (8)$$

Here, X and V represent the position and the velocity of the particle, respectively, in the multidimensional search space. The last two terms in Equation 7 are called cognitive and social components, respectively, that contribute to the velocity and position updates of each particle for the next iteration. The constant k_w is a user defined value called inertia weight [38]. The others, k_p and k_g are acceleration constants which determine the degree of influence from the particle's own best experience and current global best particle in the swarm. Finally, r_1 and r_2 are two independent random numbers having uniform distribution in the interval of [0,1]. The pseudo code of the standard PSO algorithm is given in Table 1 where T is the maximum number of iterations chosen as the termination criterion and $f\left(X^i\right)$ is the evaluation result of the objective function for the position of particle *i*. The optimal solution is equal to *GB* when the algorithm stops. Recall that the objective function in our problem is MSE between the reconstructed image obtained by the codebook list $\{X^i; i = 1,2, \dots, p\}$ and the original image. The pseudo-code of the PSO algorithm is given in Table 1.

Table 1. Pseudo-code of the basic PSO algorithm.

Initialize position X_1^i and velocity V_1^i of all particles
Define $PB_0^i = X_1^i$, $GB_1 = X_1^1$;
for $t = 1$ to T **do**
  for *Each particle in the swarm* **do**
    Evaluate objective function: $E = f\left(X_t^i\right)$;
    if E is better than $f\left(PB_{t-1}^i\right)$ **then**
      $PB_t^i \leftarrow X_t^i$;
    end if
    if E is better than $f(GB_t)$ **then**
      $GB_t \leftarrow X_t^i$;
    end if
  end
  for *Each particle in the swarm* **do**
    $V_{t+1}^i = k_w V_t^i + k_p r_1 \left(PB_t^i - X_t^i\right) + k_g r_2 \left(GB_t - X_t^i\right)$;
    if $\left|V_{t+1}^i\right| > V_{max}$ **then** clamp it to V_{max}; **end if**
    $X_{t+1}^i = X_t^i + V_{t+1}^i$;
  end
end

2.3 Simultaneous perturbation stochastic approximation algorithm

Gradient-based optimization algorithms suppose that information exists about the gradient of the objective function to optimize the parameters. But in many real-world optimization problems, gradient cannot be computed or observed directly. This difficulty led to the development of stochastic approximation (SA) algorithms. They rely on an approximation to the gradient that is achieved by only measurements of the objective function in a stochastic setting. Convergence properties of many such gradient-free stochastic algorithms are similar to those of the gradient-based algorithms [41]. SPSA is a stochastic optimization algorithm produced by Spall [20]. The SPSA algorithm has a superior feature to the other optimization methods. This feature is estimating the gradient function value when the exact gradient is not available for the objective function. Therefore, the SPSA technique increases the quality of the unknown parameters by estimating the gradient of the objective function and using it to update the unknown parameters.

All deterministic multivariate optimization algorithms aim at minimizing a differentiable objective function $f(\theta)$ by searching for zero-gradient point. When gradient g of the function cannot be directly computed in implementations (e.g., in many real-world problems), the SA algorithms can be used alternatively to update the solution vector θ_t in d-dimensional search space by

$$\theta_{t+1} = \theta_t - a_t \hat{g}_t(\theta_t) \tag{9}$$

Where, $\hat{g}_t$ is an approximation to the gradient vector g at iteration t and a_t is a scalar gain sequence that has to meet certain conditions [20]. The approximation to the gradient vector is obtained using simultaneous random perturbations and two measurements of the objective function by

$$\hat{g}_t(\theta_t) = \frac{f(\theta_t + c_t\Delta_t) - f(\theta_t - c_t\Delta_t)}{2c_t} \begin{bmatrix} \Delta_{t,1}^{-1} \\ \Delta_{t,2}^{-1} \\ . \\ . \\ . \\ \Delta_{t,d}^{-1} \end{bmatrix} \tag{10}$$

Where each element $\Delta_{t,i}$ of the vector Δ_t, takes on a value of $+1$ or -1, as generated by a zero-mean Bernoulli distribution, and c_t is a positive gain sequence. Both gain sequences are computed as follows.

$$a_t = a/(A + t)^{\alpha} \tag{11}$$

$$c_t = c/t^{\gamma} \tag{12}$$

These equations introduce five SPSA constants. In [41], Spall recommends using the following values for the three of them: the stability constant $A = 60$, $\alpha = 0.602$, and $\gamma = 0.101$. However, he deduces that the performance of the SPSA is very sensitive to the choice of both gain sequences. He adds that this problem occurs in other stochastic optimization algorithms as well, due to their own coefficients. Therefore, it is left to researchers to find suitable values for the constants a and c according to the optimization problem to be tackled. The pseudo-code of the SPSA algorithm is given in Table 2.

Table 2. Pseudo-code of the SPSA algorithm.

Initialize solution vector θ_1;
Set $A = 60$, $\alpha = 0.601$, and $\gamma = 0.101$;
Set a and c to values suitable to optimization problem;
for $t = 1$ to T **do**
- Generate d-dimensional Bernoulli distributed perturbation vector: Δ_t
- Let $a_t = a/(A + t)^{\alpha}$ and $c_t = c/t^{\gamma}$
- Compute $f(\theta_t + c_t\Delta_t)$ and $f(\theta_t - c_t\Delta_t)$
- Compute $\hat{g}_t(\theta_t)$ using Equation (10)
- Compute θ_{t+1} using Equation (9)

end

3 The proposed algorithm and its implementation on codebook optimization

3.1 The proposed algorithm: SPSA-FPSO

The algorithm proposed in this paper has an embedded structure where the SPSA algorithm performs a guidance task for the particle *gbest* only in the swarm of PSO. Thus, the combined process should be considered as a single algorithm in its own. The proposed algorithm is inspired from [35] where the SPSA process creates an alternative global best (*agbest*) particle from the positon of the particle *gbest*. If the position of *agbest* gives a better objective function value than that of the *gbest*, then it is accepted that SPSA provided a new position towards the global optimum. Next step is to replace the position of *gbest* with the position of *agbest*, thus moving it one step further towards the global optimum or perhaps moving it away from a local optimum where it is likely to get stuck. Of course, no position replacement occurs if *agbest* has a worse position. SPSA is given the opportunity to provide this guidance at each iteration, which can eventually lead the swarm to the global optimum or a point very close to it. The major difference of our algorithm from the one summarized above lies in the number of particles created by SPSA. In this paper, multiple particles instead of one, each of which is a candidate for being *agbest* are put forward as novelty. In the proposed algorithm, SPSA is applied over the position *GB* for *s* times, independently, creating an ensemble of particles with a variety of positions offering more diversity starting from this position. The particle *agbest* is determined easily after the objective function evaluations for all alternative particles in the ensemble. Let us denote the position of *agbest* by *AGB*. Now, *AGB* being an elite position will compete with *GB* of *gbest,* and whichever is the better position will be eligible to become the new *gbest*. That is, if *AGB* scores a better function evaluation value, then it will replace *GB*. Note that this strategy using SPSA only deals with *gbest* and creates some competitive particles outside the swarm. Except for this difference, the internal PSO process is kept the same. Table 3 gives the pseudo code of the proposed algorithm. You can see that the basic steps of both algorithms are included in each iteration. The innermost loop in the algorithm performs creating an ensemble of alternative particles by SPSA and determining *agbest* in the ensemble. At the beginning of the SPSA steps of the algorithm, the gain sequences a_t and c_t are updated accordingly before a new ensemble of alternative particles is generated.

The idea of using multiple SPSA-generated positions, instead of one, yields more increased diversity in the search space, proportional to the size *s*, thus granting better ability to escape from local optimum. Recall that SPSA can approach the optimum value faster than other stochastic optimization methods by simultaneously perturbing all parameters based on the approximate gradient of the objective function. The PSO and similar metaheuristic algorithms using only the exploration and exploitation ability of the population require a high computational load per iteration since they have to evaluate the objective function as many times as the number of individuals in the population. Therefore, improving metaheuristic algorithms to reach the optimum value with fewer iterations is of great importance in practice, especially when the number of unknowns is very large. Our algorithm uses the fast gradient approximation (owing to simultaneous perturbations) of the SPSA in the calculation of a better next position (codebook) for *gbest* by making different gradient approximations *s* times and selecting the best one. The classical PSO which does not use gradient information can benefit from this guidance provided by a reliable gradient approximation. It is obvious that, by SPSA-FPSO, the optimum solution can be reached with many fewer iterations due to such a valuable guidance to the *gbest*, which is known to be the only guide by the swarm.

Table 3. Pseudo-code of the SPSA-FPSO algorithm.

Initialize position X_1^i and velocity V_1^i of all particles
Define $PB_0^i = X_1^i$, $GB_1 = X_1^1$; Set size s;
Set $A = 60$, $\alpha = 0.601$, and $\gamma = 0.101$;
Set a and c to values suitable to optimization problem;
for $t = 1$ to T **do**
  for *Each particle in the swarm* **do**
    Evaluate objective function: $E = f(X_t^i)$;
    if E is better than $f(PB_{t-1}^i)$ **then**
      $PB_t^i \leftarrow X_t^i$;
    end if
    if E is better than $f(GB_t)$ **then**
      $GB_t \leftarrow X_t^i$;
    end if
  end
  Let $a_t = a/(A+t)^\alpha$ and $c_t = c/t^\gamma$;
  Define $\theta = GB_t$;
  Set F to an extreme value with respect to optimum of the objective function;
  for $k = 1$ to s **do**
  - Generate d-dimensional Bernoulli distributed perturbation vector: Δ_t
  - Compute $f(\theta + c_t\Delta_t)$ and $f(\theta - c_t\Delta_t)$
  - Compute $\hat{g}_t(\theta)$ using Equation (10)
  - Compute position of k^{th}particle: $Y^k = \theta - a_t\hat{g}_t(\theta)$
    if $f(Y^k)$ is better than F **then**
      $AGB \leftarrow Y^k$ and $F = f(Y^k)$;
    end if
  end
  if $f(AGB)$ is better than $f(GB_t)$ **then**
    $GB_t \leftarrow AGB$;
  end if
  for *Each particle in the swarm* **do**
    $V_{t+1}^i = k_w V_t^i + k_p r_1(PB_t^i - X_t^i) + k_g r_2(GB_t - X_t^i)$;
    if $|V_{t+1}^i| > V_{max}$ **then** clamp it to V_{max};
    end if
    $X_{t+1}^i = X_t^i + V_{t+1}^i$;
  end
end

3.2 Implementation on codebook optimization

Figure 2 illustrates the block-based lossy image compression system including the proposed optimization algorithm used for codebook estimation. At the beginning, the original image data is converted to a list of vectors based on 4×4 image blocks as explained in Section 2.1. Then, a separate initial codebook is prepared for each particle using the standard K-Means algorithm while velocity of each particle is initialized randomly. After the initialization, the iterative algorithm given in Table 3 is applied to find the optimal codebook. In each iteration, the codebook *gbest* evolved by the PSO rules is passed to the SPSA algorithm where it produces an ensemble of size s new codebooks each of which corresponds to an alternative particle. Among the SPSA generated ensemble, the best one is selected and recorded as *agbest*. If the codebook of *agbest* is better than that of *gbest*, then it replaces the poorer codebook. Finally, the PSO swarm of codebooks are updated by Equations (7) and (8) for the next iteration. When the iteration number reaches to the maximum number, the best codebook of the swarm (*gbest*) is determined by the SPSA-FPSO. To achieve a lossy compression, each image block is simply replaced by index of the relevant codeword in the best codebook. This process results in an indexed image which is further encoded for a communication channel by a lossless technique such as arithmetic coding or Huffman coding. After the encoding process, the best codebook and the encoded image are sent over the channel. The indexed image is extracted after channel decoding at the receiver end. Finally, the reconstructed image is obtained by using the best codebook.

4 Experimental work

The experimental study presented in this section was conducted to obtain and compare the performance of codebook estimation of the base algorithms and the proposed hybrid algorithm on a test image set. In addition, the effect of s on the performance of the hybrid algorithm was also investigated.

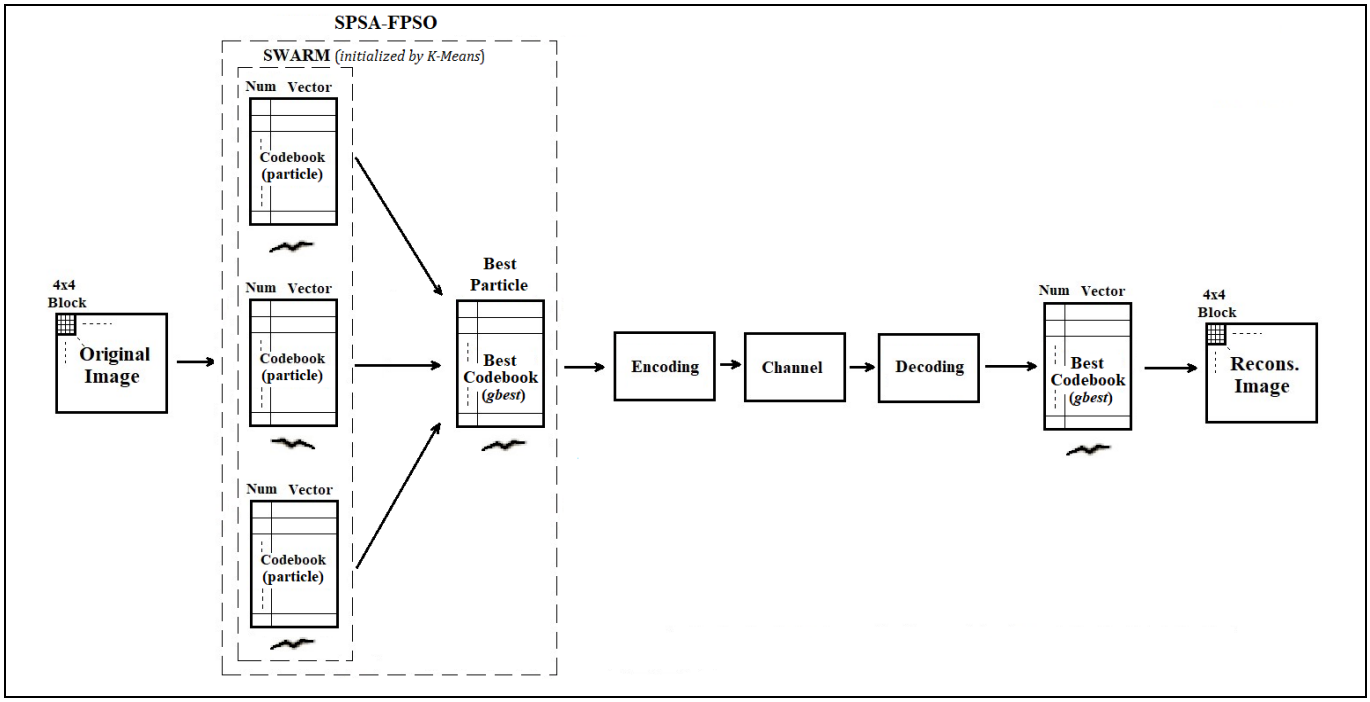


Figure 2. Block diagram of the VQ-based lossy image compression system using SPSA-FPSO.

4.1 Test images and experimental arrangements

In the experiments, six gray level test images, known from the image processing research field were used. The test images are of 256×256 pixels size and show different contrast levels and degree of detail. Of these, *Aerial* and *Barbara* are categorized as high contrast images. While *Cameraman*, *Lena* and *Peppers* have a fair contrast, the *Clock* image presents a low contrast with uneven distribution of details. To allow visual comparison of test results, only two representative samples were selected for the sake of space saving: *Lena* with medium contrast and *Clock* with low contrast and uneven detail distribution. The results are shown in the Section 4.2.

The experiments were conducted as follows. Each original test image divided into 4×4 pixel image blocks were converted to a list of vectors of size 16×1 with 256 gray levels. Thus, each image consists of 4096 vectors to be quantized and encoded, in total. A unique initial codebook for each particle in the swarm was computed by the K-Means algorithm based on the Forgy selection method [36]. The initial codebooks were also recorded for using in every run of the algorithms on each test image. For the PSO and SPSA-FPSO algorithms, all particles' initial positions and the initial best positions were set to these initial codebooks. Similarly, the solution vector θ_1 in the SPSA algorithm was also initialized to the first recorded codebook.

Since the visual error of the reconstructed image is more evident at high compression ratios, a codebook size of 8 codewords was preferred in all experiments. This codebook size corresponds to the image compression ratio of 0.203 bpp. Therefore, the number of unknowns (i.e., pixel gray level values) in any codebook was 128 since each codeword has 16 unknown gray levels. Thus, an optimum codebook for any test image must be found by any algorithm in the 128-dimensional search space. The MSE given by Equations (1)-(3), between an original image and its reconstructed form obtained from any individual codebook C were computed in the optimization algorithms. Each algorithm tested in the experiments tried to converge to the optimum codebook with a global minimum MSE value for each test image. However, when the maximum number of iterations was reached, the goodness of their estimation was revealed by the difference between the MSE of the final codebook they could produce and the global minimum. For all test runs on all the algorithms, the maximum number of iterations was determined as T=1500. This number was used as the single termination rule for every run of an optimization algorithm as seen in Tables 1-3.

The parameters of the optimization algorithms were chosen as follows. The number of particles (i.e., size p) in both the PSO and SPSA-FPSO algorithms was set to 100. The number of alternative particles in the SPSA-FPSO algorithm was set to different values of $s = 1, 3, 10, 25,$ and 50, for performance comparisons. The user-defined parameter of k_w was selected as 0.7 while k_p and k_g were determined as 1.0 and 2.0, respectively. The velocity of the particles was restricted to $V_{max} = 10$ for both the PSO and SPSA-FPSO algorithms. For A, α and γ in the SPSA algorithm, the recommended values were used as 60, 0.602 and 0.101, respectively, while a and c were set to 15 and 0.25, respectively. Because the last two parameters must be determined with respect to the optimization problem and the range of values for the unknowns, they were adjusted to best values after conducting a series of trial runs. However, for the SPSA-FPSO algorithm, we needed to dynamically change the value of a during the iterations to boost the acceleration ability of the proposed hybrid algorithm. While some smaller value of a contributes to the acceleration of convergence at early iterations, a larger value as in the SPSA algorithm strikingly reduces the probability of getting stuck in a local minimum in the subsequent iterations. A function of t for a was determined empirically to use in the SPSA-FPSO algorithm as given in Equation (13).

$$a = t/50 + 5 \quad (13)$$

The equation should be inserted into the pseudo-code in Table 3 before the line where the gain sequences a_t and c_t are computed.

4.2 Test results

Here, the proposed SPSA-FPSO algorithm is compared to the basic PSO and SPSA algorithms in an experimental framework. The visual results of the base algorithms and the proposed algorithm for the two selected test images are shown in Figures 3 and 4 after a test run for each algorithm was completed. For *Lena*, when the last iteration was completed, the SPSA and PSO algorithms reached the unsatisfactory values of MSE=368.7 and MSE=329.6, respectively while the proposed SPSA-FPSO algorithm achieved the almost global optimum value of MSE=323.5 with only three alternative particles (i.e., $s = 3$). When the low contrast image *Clock* was used by the algorithms, the SPSA-FPSO algorithm reached the value of MSE=271.9 which is nearly global minimum again. On the other hand, SPSA and PSO appeared with MSE=305.9 and MSE=281.9, respectively at the last iteration, still struggling for the global optimum. This superiority of the proposed algorithm over the others can also be visually noticed in the reconstructed images shown in Figures 3 and 4.

The convergence curves of the all algorithms used to estimate the optimum codebooks for the all test images are shown in Figure 5. Here, each algorithm was run nine times for each of the test images. Then, the median value of the nine MSE curves was computed point by point to obtain an average curve. Therefore, every curve plotted in Figure 5 is actually a median average and represents the convergence characteristics of an algorithm with a fair approximation. The PSO algorithm either got stuck at a local minimum or fails to complete its convergence when the maximum number of iterations was reached for all images except *Aerial* and *Peppers*. On the other hand, the SPSA-FPSO algorithm reached the global minimum or settled at a very close value for all images except *Cameraman*. For this image, the proposed algorithm converged to a nearby value only with $s = 50$. This is a difficult image for optimization algorithms used in codebook estimation of block-based compression. The image contains long strong edges at many different orientations. This forces the optimization algorithms to concentrate on those edges, leading to the ignorance of the rest of the image when MSE is the objective function. As a result, the algorithms mostly got trapped into a local minimum for this image. Note that the proposed algorithm converges quickly to the global minimum even for small values of s (i.e., 3 and 10). These results prove that the SPSA guidance provided by several alternative particles increases the diversity of the basic PSO in the search space and moves *gbest* to a more efficient position in each iteration. In short, we can say that SPSA can guide (or drive) *gbest* better than PSO can.

The descent rate in the convergence curves of the SPSA-FPSO algorithm, especially in the early iterations is also remarkable. Considering only the number of iterations, the proposed algorithm clearly outperforms the base algorithms in terms of convergence speed.

The fact that SPSA lags far behind other algorithms in the descent of convergence curves can be explained by its low exploration effort per iteration (one new codebook generation only). This algorithm needs more iterations for convergence, although this does not mean that it needs more time. On the contrary, it may require less time when the number of function evaluations is taken into account. However, it is shown in [35] that the SPSA algorithm fails if the target function has too many local optima or the number of unknown parameters is large.



Figure 3. Visual comparison of the reconstructed images for *Lena*. (a): Original, (b) SPSA result (MSE=368.7). (c): PSO result (MSE=329.6), and (d): SPSA-FPSO result for $s = 3$ (MSE=322.0).

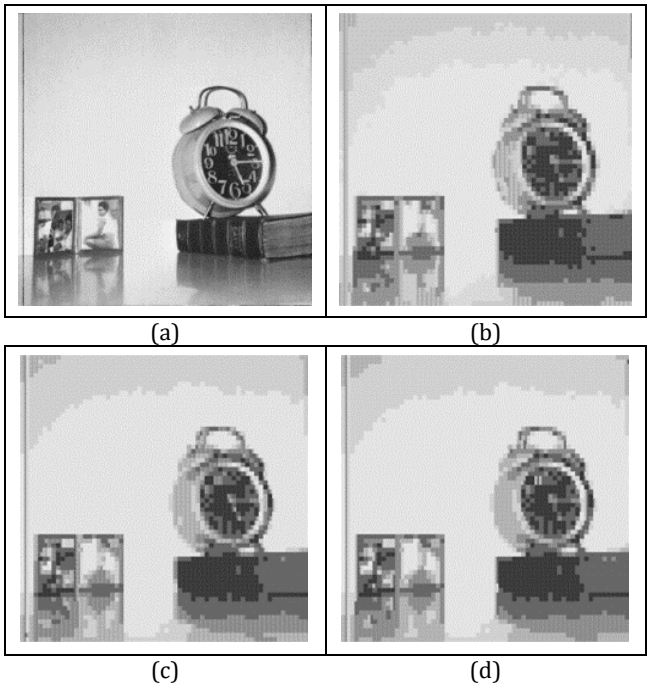


Figure 4. Visual comparison of the reconstructed images for Clock. (a): Original. (b): SPSA result (MSE=302.3). (c): PSO result (MSE=281.7) and (d): SPSA-FPSO result for $s = 3$ (MSE=271.9).

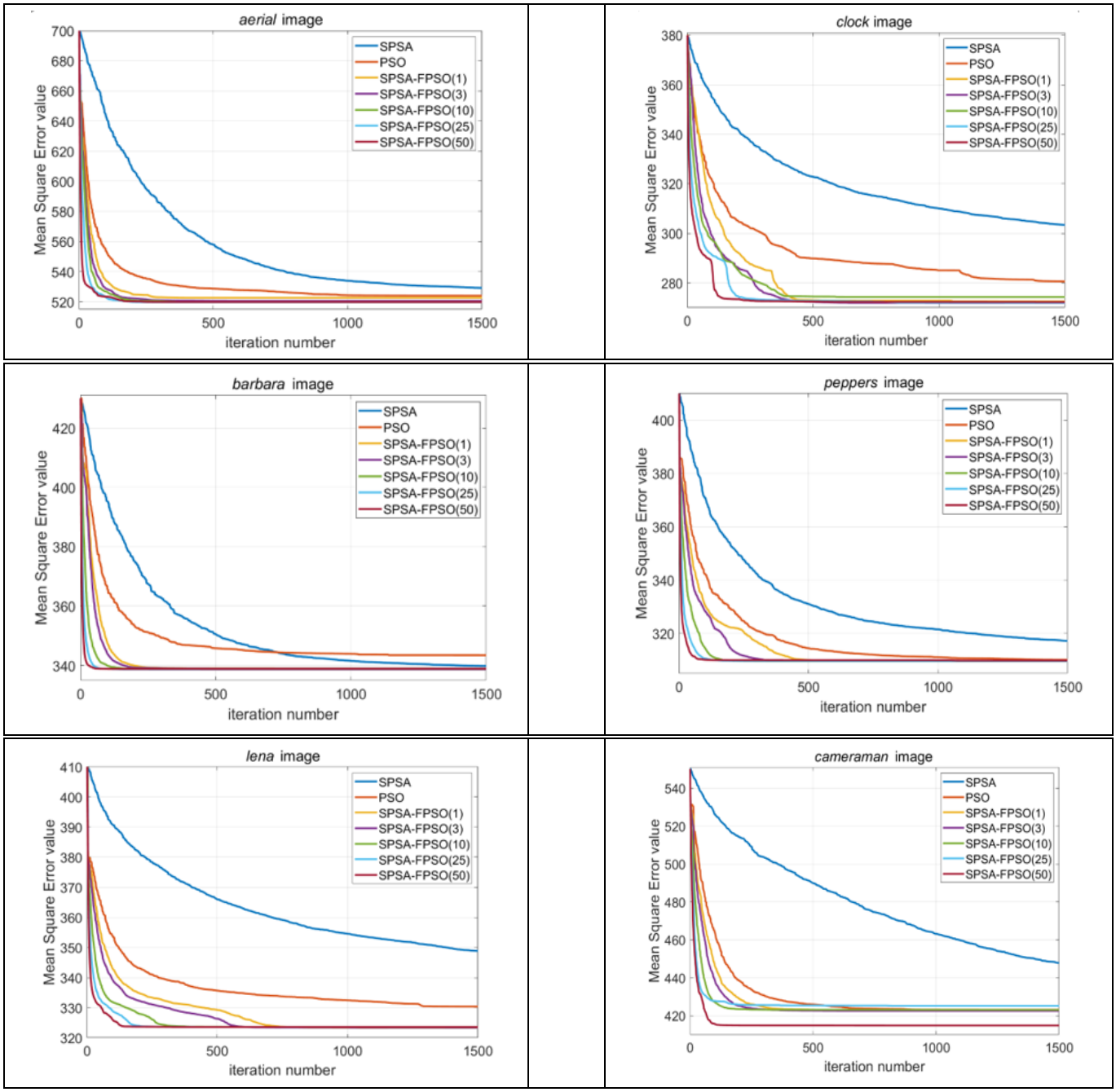


Figure 5. Convergence curves of SPSA-FPSO with different s values (given between parenthesis) on codebook estimation for six test images ($N_C = 8$).

An overview of the results regarding the convergence accuracy and speed on the test images is given in Table 4. The optimal MSE values (MSE_{op}) obtained with $N_C = 8$ for each image are appended next to the image name and shown underlined. For each algorithm, the median of the final MSE values is written in gray cells. It is seen that SPSA-FPSO can rapidly converge to the corresponding MSE_{op} for all images except *Cameraman*. However, note that all the algorithms fail to reach the MSE_{op} value of this image due to its characteristics explained above. To simplify the comparison of the convergence accuracies, a near optimal MSE value was chosen at 1% above the global optimum and represented by MSE_{no}. All the median MSE values that are less than or equal to MSE_{no} (i.e., within 1% tolerance) were considered accurate and shown in bold. In conclusion, it can be said that SPSA-FPSO is clearly superior to the base algorithms when the convergence accuracy is taken into account. It should also be noticed that the effect of s on the convergence accuracy of the SPSA-FPSO algorithm is small. However, the opposite is true when the convergence speed is concerned. To compare the convergence speeds, the numbers in the white cells in Table 4 can be used. They are the iteration numbers, denoted by t_{no}, at which the algorithms reached the MSE_{no} value for each image. Each t_{no} number is the median of such iteration numbers found over nine runs. Let us take the *aerial* image for example.

Table 4. Results of convergence accuracy (final MSE) and iteration number (t_{no}) on test images.

Image name	$\underline{\text{MSE}_{op}}$ / MSE_{no}	SPSA	PSO	SPSA-FPSO				
				$s=1$	$s=3$	$s=10$	$s=25$	$s=50$
Aerial	$\underline{518.4}$	529.1	**523.4**	**522.6**	**520.5**	**519.6**	**519.6**	**519.8**
	523.6	-	975	268	149	140	97	89
Clock	$\underline{271.4}$	303.3	280.5	**272.5**	**271.9**	**274.0**	**271.9**	**272.2**
	274.1	-	-	412	362	399	218	133
Barbara	$\underline{338.6}$	**339.8**	**342.4**	**338.9**	**338.9**	**338.8**	**338.7**	**338.8**
	342.0	934	1500	142	117	67	36	19
Peppers	$\underline{309.5}$	317.2	**310.1**	**309.6**	**309.6**	**309.6**	**309.6**	**309.8**
	312.6	-	659	375	224	114	71	44
Lena	$\underline{322.8}$	348.8	330.4	**323.3**	**323.4**	**323.6**	**323.6**	**323.6**
	326.0	-	-	623	512	253	150	99
Cameraman	$\underline{405.5}$	447.8	423.1	422.7	422.3	423.0	425.2	414.8
	409.6	-	-	-	-	-	-	-

The table points out that PSO reach MSE_{no} at 975th iteration while SPSA cannot achieve it in 1500 iterations. The proposed algorithm reaches the same value at 268th, 149th, 140th, 97th and 89th iterations for the values of $s = 1, 3, 10, 25,$ and 50, respectively. When all the t_{no} numbers are examined, it is seen that the SPSA-FPSO algorithm converges much faster than both PSO and SPSA algorithms for all test images. Even with s =1, the proposed algorithm can reduce the number of iterations required for the convergence of the PSO algorithm quite a lot. In addition, the experimental results show that as the number of alternative particles (codebooks) increases, the speed in iteration axis also increases. This result clearly indicates the effectiveness of multiple alternative particles generated by SPSA in our hybrid algorithm for increasing diversity and providing accurate guidance in a search space.

4.3 Comparison of computational loads

When computational complexities of optimization algorithms are compared, considering the number of objective function evaluations instead of the iteration number at the global optimum is a more accurate approach. For most algorithms, the computational cost of a single objective function evaluation is much heavier than the implementation cost of the optimization algorithm itself. This is also true for the proposed algorithm and the base algorithms since MSE computation between an original image and a reconstructed image by using a codebook is relatively long. Assuming that the necessary function evaluations are stored in memory once computed, the PSO algorithm requires p function evaluations while SPSA-FPSO requires $p + 3s$ evaluations per iteration.

Although this relationship makes SPSA-FPSO seem to be computationally expensive, the reality is different because SPSA-FPSO converges earlier by the iteration number. Therefore, it is more sensible to find the total number of function evaluations that each algorithm does until it reaches the iteration number t_{no}. Then, the costs of the algorithms can be compared according to their number of function evaluations. The total number of function evaluations, denoted by n_f, for PSO and SPSA-FPSO until they reach the associated iteration number t_{no} given in Table 4 is computed by

$$n_f = (p + 3s)t_{no} \tag{14}$$

where n_f for PSO is found by taking $s = 0$. Let us define experimental computational advantage as the ratio of the n_f value for PSO to the n_f value for SPSA-FPSO. The computational advantage of SPSA-FPSO over PSO for varying number of alternative particles are listed in Table 5 where the n_f value for PSO on each test image is given next to the image name. Comparisons were made only for test images where PSO reached MSE_{no}. One can notice that the computational advantage is unsuprisingly image dependent and can be up to order of 30 times.

To investigate the effect of using multiple alternative particles on the convergence speed in the time dimension, the computational advantages of SPSA-FPSO with multiple particles over single particle use were obtained and listed in Table 6.

Here, the n_f value for $s = 1$ on each test image is given next to the image name and taken as the reference in the calculations of the computational advantages. As seen from the table, the number of multiple alternative particles increases the computational advantage of SPSA-FPSO (i.e., less run time) compared to using a single particle. However, the increase in the computational advantage by the number of alternative particles can be high or remain within marginal limits depending on the image content.

4.4 Performance comparison to other metaheuristic algorithms

Finally, some tests were conducted to compare the performance of the SPSA-FPSO algorithm with the performances of other well-known metaheuristic algorithms in the application of codebook optimization. Bat algorithm (BA), firefly algorithm (FA), genetic algorithm (GA) and improved adolescent identity search algorithm (IAISA) were included in these tests, respectively. The parameters of the SPSA-FPSO algorithm were kept the same as given in Section 4.1. The tests were performed by selecting the number of alternative global particles as 3 and 25. In all algorithms, the population size and codebook size were fixed as 100 and 8, respectively. The parameter values of other metaheuristic algorithms were selected as given in Table 7, which are considered appropriate in [17] for the codebook optimization problem. Convergence curves of all algorithms were obtained for the two selected test images. The results are given in Figure 6. It is seen that SPSA-FPSO is superior not only to PSO algorithm but also to other metaheuristic algorithms in terms of both convergence accuracy and convergence speed.

Table 5. Computational complexity comparison: PSO vs. SPSA-FPSO on the test images.

Image name	PSO n_f	Computational advantage of SPSA-FPSO over PSO				
		$s=1$	$s=3$	$s=10$	$s=25$	$s=50$
Aerial	97500	3.53	6.00	5.36	5.74	4.38
Barbara	150000	10.26	11.76	17.22	23.81	31.58
Peppers	65900	1.71	2.70	4.45	5.30	5.99

Table 6. Computational complexity comparison: single vs. multiple alternative particles in SPSA-FPSO.

Image name	SPSA-FPSO (s=1) n_f	Computational advantage of SPSA-FPSO with multiple alternative particles			
		$s=3$	$s=10$	$s=25$	$s=50$
Aerial	27604	1.70	1.52	1.63	1.24
Clock	42436	1.08	0.82	1.11	1.28
Barbara	14626	1.15	1.68	2.32	3.08
Peppers	38625	1.58	2.61	3.11	3.51
Lena	64169	1.15	1.95	2.44	2.59

Table 7. Parameters of the metaheuristic algorithms

Algorithm	Parameter values
FA	$\alpha = 0.5,\ \gamma = 0.01,\ \beta_0 = 0.9$
BA	$\alpha = 0.997,\ \gamma = 0.996$, [min max] frequencies: [0,1] initial values (random): frequency [0,1], pulse rate [0.5, 1], loudness [0,1]
GA	crossover rate =10%, mutation rate =3%, selection method is K-Tournament ($K=3$)
IASIA	search diameter=0.025, Chebyshev polynomial degree=3

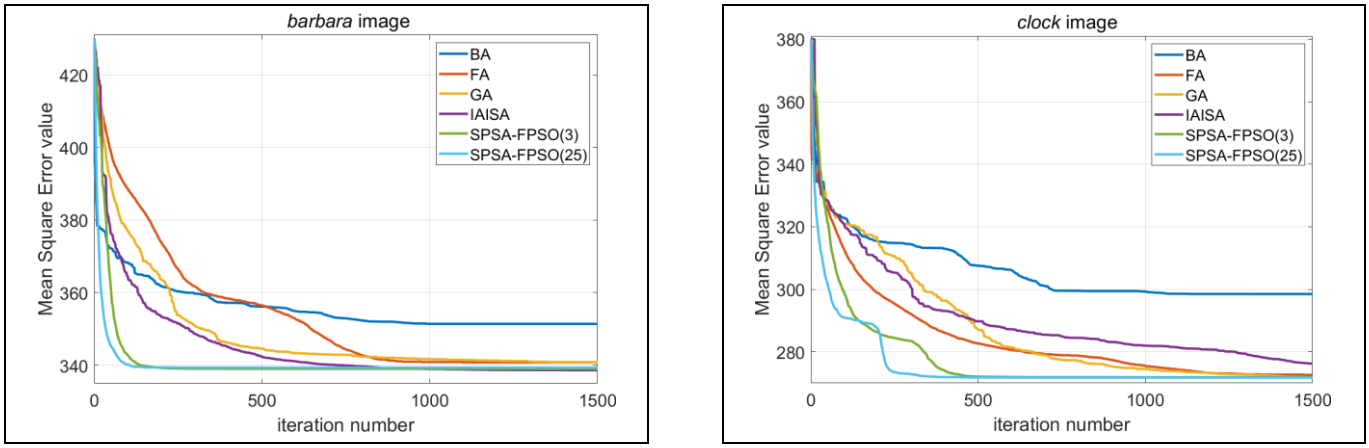


Figure 6. Convergence curves of the metaheuristic algorithms for comparison to SPSA-FPSO on codebook estimation for two test images ($N_C = 8$).

5 Conclusions

The use of VQ offers an effective approach to lossy image compression by mapping image blocks into codebook vectors, significantly reducing the image size. Key to the success of VQ-based compression is the estimation of an optimal codebook, which directly impacts the quality of the reconstructed image. Optimal codebook generation through metaheuristic algorithms has gained significant attention in many research areas. Although the hybridization of these methods, particularly in a coupled way to enhance both convergence speed and accuracy has been applied in various research areas, it has not received much attention in solving the codebook estimation problem.

The motivation for this work is to overcome the inherit diversity limitations of PSO by hybridizing it with SPSA which can generate new codebooks by fast gradient approximations to the objective function MSE.

In the proposed hybrid algorithm, the codebook owned by *gbest* of PSO is passed to the SPSA algorithm to have it generate an ensemble of s new codebooks, so-called alternative global codebooks, to guide *gbest* further. The best of the alternative codebooks in the ensemble replaces, (if it is better than) that of *gbest* to provide a more efficient guidance to the entire swarm in the next iteration. The second contribution of this work is the presentation and discussion of the results obtained from the first-time application of this high performance optimization

algorithm to codebook estimation in VQ-based lossy image compression. The results of the experiments conducted on six test images highlight the superiority of the SPSA-FPSO algorithm over the base algorithms PSO and SPSA in the context of VQ-based image compression. By embedding the SPSA within the PSO framework, the hybrid algorithm successfully reduces the premature convergence issues typically observed in PSO, enabling it to escape local minima and reach or approximate the global minimum.

It is shown that the SPSA-FPSO algorithm increases the diversity by using multiple alternative codebooks and provides more accurate guidance in the search space. The algorithm not only achieves lower MSE values for the test images, but also significantly improves the convergence speed without sacrificing accuracy. The proposed algorithm reaches or settles very close to the global minimum for all test images except a troublesome image. However, the best performer among the algorithms in competition happens to be SPSA-FPSO again. Especially in the early iterations, the speed at which the proposed algorithm approaches the global minimum is remarkable, which can also make it a good global optimization partner for a faster local optimizer.

When the computational loads are compared, it is seen that SPSA-FPSO algorithm requires a smaller number of objective function evaluations than PSO does and therefore the total computational cost is lower. However, the computational advantage offered by the algorithm is data dependent and cannot be foreseen exactly. Although the computational advantages experimented from the test images may give a rough idea, there are also other issues affecting the range of figures, namely, selection of the initial codebook and optimization of the algorithm parameters. The experimental results also show that the number of alternative global codebooks (i.e., value of s) positively influence the convergence speed while it has a small or trivial effect on accuracy. However, the computational advantage gained by increasing the number of alternative particles can either be significant or minimal, depending on the image content.

The study concludes that the enhanced convergence features of SPSA-FPSO make it a promising method for optimizing codebook in VQ-based lossy image compression tasks. It outperforms not only the basic PSO but also other well-known metaheuristic algorithms. Considering that the target of this research is image compression, the results could potentially pave the way for the utilization of the suggested approach in related areas that prioritize compression and optimization, including data compression and signal processing. From a broader perspective, the findings of this work suggest that the SPSA-driven PSO algorithm employing an ensemble of alternative global particles can also be effectively applied to optimization problems in other research areas, offering a fast and stable solution especially for complex, high-dimensional problems.

6 Author contribution statements

In the scope of this study, Ilker Kılıç contributed by reviewing the literature, forming the methodology, developing the software, performing formal analysis, and writing the manuscript. Haldun Sarnel contributed by reviewing the literature, forming the idea and methodology, supervision of the experiments, performing data curation, and writing the manuscript.

7 Ethics committee approval and conflict of interest statement

There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared. There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared.

8 References

[1] Gray RM. "Vector Quantization". *IEEE ASSP Magazine*, 1(1), 4-29, 1984.

[2] Wu Z, Yu J. "Vector quantization: a review". *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 20(4), 507-524, 2019.

[3] Kumar G, Kumar R. "Analysis of Arithmetic and Huffman Compression Techniques by Using DWT-DCT." *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing*, 4, 63-70, 2021.

[4] Lu TC, Chang CY. "A Survey of VQ Codebook Generation". *Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing*, 1(3), 190-203, 2010.

[5] Yang SB. "Constrained-Storage multistage vector quantization based on genetic algorithms". *Pattern Recognition*, 41(2), 689–700, 2008.

[6] Chiranjeevi K, Jena UR. "Image compression based on vector quantization using cuckoo search optimization technique". *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 1417–1431, 2018.

[7] Tsai CW, Tseng SP, Yang CS, Chiang MC. "Preaco: A fast ant colony optimization for codebook generation". *Applied Soft Computing*, 13(6), 3008–3020, 2013.

[8] Feng HM, Chen CY, Ye F. "Evolutionary fuzzy particle swarm optimization vector quantization learning scheme in image compression". *Expert Systems with Applications*, 32(1), 213–222, 2007.

[9] Horng MH. "Vector quantization using the firefly algorithm for image compression". *Expert Systems with Applications*, 39(1), 1078–1091, 2012.

[10] Guo JR, Wu CY, Huang ZL, Wang FJ, Huang MT. "Vector quantization image compression algorithm based on bat algorithm of adaptive separation search". *International Conference on Advanced Intelligent Systems and Informatics*, Cairo, Egypt, 11-13 December 2021.

[11] Geetha K, Anitha V, Elhoseny M, Kathiresan S, Shamsolmoali P, Selim MM. "An evolutionary lion optimization algorithm-based image compression technique for biomedical applications". *Expert Systems*, 38(1), Article e12508, 2021.

[12] Kumari GV, Rao GS, Rao BP. "Flower pollination-based K-means algorithm for medical image compression". *International Journal of Advanced Intelligent Paradigms*, 18(2), 171–192, 2021

[13] Rahebi J. "Vector quantization using whale optimization algorithm for digital image compression". *Multimedia Tools and Applications*, 81(14), 20077–20103, 2022.

[14] Althobaiti MM. *Crow Search Algorithm Based Vector Quantization Approach for İmage Compression in 6G Enabled Industrial Internet of Things Environment*. Editors: Gupta D, Ragab M, Mansour RF, Khamparia A, Khanna A. AI-enabled 6G networks and applications, 55–73, Wiley, 2023.

[15] Nag S. "Vector quantization using the improved differential evolution algorithm for image compression". *Genetic Programming and Evolvable Machines*, 20, 187–212, 2019.

[16] Ghadami R, Rahebi J. "Compression of images with a mathematical approach based on sine and cosine equations and vector quantization (VQ)". *Soft Computing*, 27(22), 17291–17311, 2023.
[17] Kilic I, Cetin M. "Improved adolescent identity search algorithm for block-based image compression". *Expert Systems with Applications*, 237, 121715, 2024.
[18] Kilic I. "A novel codebook generation by smart fruit fly algorithm based on exponential flight". *The International Arab Journal of Information Technology*, 20(4), 584-591, 2023.
[19] Kilic I. "A Levy flight based BAT optimization algorithm for block-based image compression". *Technicki Glasnik–Technical Journal,* 16(4), 477-483, 2022.
[20] Spall JC. "Multivariate stochastic approximation using a simultaneous perturbation gradient approximation". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 37(3), 332-341, 1992.
[21] Chen S, Mei T, Luo M, Yang X. "Identification of nonlinear system based on a new hybrid gradient-based PSO algorithm". *ICIA 2007 International Conference on Information Acquisition*, Jeju City, Korea, 8-11 July 2007.
[22] Kaveh A, Talatahari S. "A hybrid particle swarm and ant colony optimization for design of truss structures". *Asian Journal of Civil Engineering*, 9(4), 329–48, 2008.
[23] Plevris V, Papadrakakis M. "A hybrid particle swarm-gradient algorithm for global structural optimization". *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 26(1), 48-68, 2011.
[24] Cherki I, Chaker A, Djidar Z, Khalfallah N, Benzergua F. "A sequential hybridization of genetic algorithm and particle swarm optimization for the optimal reactive power flow". *Sustainability*, 11(14), 3862, 2019.
[25] Seyedpoor SM, Gholizadeh S. Talebian SR. "An efficient structural optimisation algorithm using a hybrid version of particle swarm optimisation with simultaneous perturbation stochastic approximation". *Civil Engineering and Environmental Systems*, 27(4), 295–313, 2010.
[26] Wessels S, van der Haar D. "Using particle swarm optimization with gradient descent for parameter learning in convolutional neural networks". *CIARP 25th Iberoamerican Congress*, Porto, Portugal, 10-13 May 2021.
[27] Pujari AK, Veeramachaneni SD. "Gradient based hybridization of PSO". *CSAI 2023 International Conference on Computer Science and Artificial Intelligence*, Beijing, China, 08-10 December 2023.
[28] Barroso ES, Parente JE, Cartaxo de Melo AM. "A hybrid PSO-GA algorithm for optimization of laminated composites". *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 55(6), 2111–2130, 2017.
[29] Parouha RP, Verma P. "Design and applications of an advanced hybrid meta-heuristic algorithm for optimization problems". *Artificial Intelligence Review*, 54, 5931–6010, 2021.
[30] Shankar T, Shanmugavel S, Rajesh A. "Hybrid HSA and PSO algorithm for energy efficient cluster head selection in wireless sensor networks". *Swarm and Evolutionary Computation*, 30, 1–10, 2016.
[31] Chegini SN, Bagheri A, Najafi F. "PSOSCALF: A new hybrid PSO based on Sine and Cosine Algorithm and Levy Flight for solving optimization problems". *Applied Soft Computing*, 73, 697-726, 2018.
[32] Şenel FA, Gokce F, Yuksel AS, Yigit T. "A novel hybrid PSO–GWO algorithm for optimization problems". *Engineering with Computers*, 35(4), 1359–1373, 2019.
[33] Kaya S, Karaçizmeli İH, Aydilek İB, Tenekeci ME, Gümüşçü A. "The effects of initial populations in the solution of flow shop scheduling problems by hybrid firefly and particle swarm optimization algorithms". *Pamukkale University Journal of Engineering Science*, 26(1), 140–149, 2020.
[34] Qiao J, Wang G, Yang Z, Luo X, Chen J, Li K, Li P. "A hybrid particle swarm optimization algorithm for solving engineering problem". *Scientific Reports*, 14(1), 8357, 2024.
[35] Kiranyaz S, Ince T, Gabbouj M. "Stochastic approximation driven particle swarm optimization with simultaneous perturbation-who will guide the guide?". *Applied Soft Computing*, 11(2), 2334–2347, 2011.
[36] Lloyd SP. "Least squares quantization in PCM". *IEEE Transactions on Information Theory*, IT-28(2), 129-137, 1982.
[37] Pena JM, Lozano JA. Larranage P. "An empirical comparison of four initialization methods for the K-Means algorithm". *Pattern Recognition Letters*, 20, 1027-1040, 1999.
[38] Kennedy J, Eberhart R. "Particle swarm optimization". *IEEE International Conference on Neural Networks*, Australia, 27 November- 1 December 1995.
[39] Shi Y, Eberhart R. "A modified particle swarm optimizer". *IEEE Congress on Evolutionary Computation,* USA; 4-9 May 1998.
[40] Gad AG. "Particle Swarm Optimization algorithm and its applications: A systematic review". *Archives of Computational Methods in Engineering,* 29, 2531–2561, 2022.
[41] Spall JC. "Implementation of the simultaneous perturbation algorithm for stochastic optimization". *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*, 34(3), 817-823, 1998.

Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 31(7), 1268-1276, 2025

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Renewable energy production in Artvin Çoruh University ANG Botanical Garden: Potential, application and challenges

Artvin Çoruh Üniversitesi ANG Botanik Bahçesi'nde yenilenebilir enerji üretimi: Potansiyel, uygulama ve zorluklar

Adalet Keskin[1*], *Elanur Adar Yazar*[2], *Kadir Doğanşahin*[3]

[1]Department of Electricity and Energy, Borçka Acarlar Vocational High School, Artvin Çoruh University, Artvin, Türkiye.
adalet.keskin@artvin.edu.tr

[2]Department of Occupational Health and Safety, Faculty of Health Sciences, Artvin Çoruh University, Artvin, Türkiye.
aelanur@artvin.edu.tr

[3]Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Malatya Turgut Özal University, Malatya, Türkiye.
kadir.dogansahin@ozal.edu.tr

Received/Geliş Tarihi: 19.12.2024 Revision/Düzeltme Tarihi: 12.03.2025 doi: 10.5505/pajes.2025.78245
Accepted/Kabul Tarihi: 19.04.2025 Research Article/Araştırma Makalesi

Abstract

This study evaluates the capability of renewable energy sources (wind, solar and biomass) to meet the energy needs of Artvin Coruh University Ali Nihat Gokyigit Botanical Garden. As a result of the study, it has been determined that the wind speed in the region is insufficient for electricity generation from wind energy, as 0.0845 kW/h. In the analyses performed on the PVsol environment for the potential of a PV system, it has been concluded that 256.9 MWh of energy could be generated annually. The economic analyses resulted in the payback period of the PV system being calculated as 8.8 years. It was also suggested that the annual average of 3500-5000 kg of pruning waste could be utilised by elemental analysis and incineration or used for biogas production by anaerobic digestion together with food waste (27 tonnes/year). The study aims to raise awareness for on-site energy production by using local resources and thus reducing energy costs.

Keywords: Renewable energy, Wind energy, Solar energy, Biomass energy, Weibull distribution, PVSOL.

Öz

Artvin Çoruh Üniversitesi Ali Nihat Gökyiğit (ANG) Botanik Bahçesi'nin enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla bu çalışma, yenilenebilir enerji kaynaklarının (rüzgâr, güneş ve biyokütle) değerlendirmesini sunmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda rüzgâr enerjisi potansiyelinin düşük olduğu (0.0845 kW/saat) tespit edilirken, PVSOL simülasyon progrmaı ile gerçekleştirilen güneş enerjisi projesi, yıllık 256,9 MWh enerji üretimi ve 8.8 yıllık geri ödeme süresiyle ekonomik olarak uygulanabilir bulunmuştur. Ayrıca, yıllık ortalama 3500-5000 kg olan budama atıklarının elementel analizi yapılarak yakma yoluyla değerlendirilebileceği veya yemek atıklarıyla (27 ton/yıl) birlikte anaerobik çürütme ile biyogaz üretimi için kullanılabileceği önerilmiştir. Çalışma, yerel kaynakların kullanılarak yerinde enerji üretimi yapılması ve böylece enerji giderlerinin azaltılmasına yönelik farkındalık oluşturmayı hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir enerji, Rüzgar enerjisi, Güneş enerjisi, Biyokütle enerjisi, Weibull dağılımı, PVSOL.

1 Introduction

Energy is among the most basic requirements of life, and the quest for meeting energy demand is as old as the beginning of life. Over time, the diversified and increasing use of energy has begun to take its place at the center of civilizational competition with the industrial revolution. The increase in the world population and the acceleration of industrialization have increased energy consumption and made the environmental impacts of the widely used fossil fuels even more critical. Energy consumption is expected to double in 2035 compared to 1998 and triple in 2055. Non-renewable fossil fuels and nuclear energy pose a serious threat to the environment and human health. Especially the transportation sector (95% oil dependency) is an important dimension of this problem and is expected to increase in the coming years [1]. As a solution to these problems, governments are implementing policies that encourage the use of renewable energy sources and taking various measures to increase energy efficiency and reduce carbon emissions.

In recent years, many studies have focused on the use of renewable energy sources in public buildings in order to meet the increasing energy demand and ensure environmental sustainability. These studies examine the evaluation and integration of different sources such as solar, wind and biomass energy [2]-[7]. A study conducted in Poland has proven that energy savings of up to 80% and significant CO_2 emission reductions can be achieved by reducing energy demand through thermo-modernization of school buildings and the use of renewable energy systems [7]. A study examining data for Türkiye for the period 1990-2020 showed that economic growth, urbanization and industrialization increased carbon dioxide emissions, but renewable energy use, agricultural productivity and forest areas reduced emissions [6]. The analysis revealed that a 1% increase in economic growth, urbanisation, industrialisation and tourism would increase emissions by 0.39%, 1.22%, 0.24% and 0.02% respectively, while an increase in renewable energy, agriculture and forestry would decrease emissions by 0.43%, 0.12% and 3.17% respectively. Various studies have been conducted on the use of renewable energy in public buildings in Türkiye. In [5], an

*Corresponding author/Yazışılan Yazar

economic analysis for solar and wind energy systems has been made for the Çanakkale 112 Emergency Call Center, and the feasibility of these systems has been proven by the resulting short payback periods after the analyses. [4] determined the most suitable configuration for a hybrid solar energy system at Eskişehir Technical University. [3] analysed the energy saving potential of solar energy and heat pump systems at Yalova University and showed that significant energy savings can be achieved. [2] analysed the implementation of photovoltaic systems at Harran University Osmanbey Campus. These studies support the technical and economic feasibility of renewable energy integration in public buildings in Türkiye. Studies in Croatia [8], Russia [9] and Türkiye [10] address the utilisation of waste for sustainable energy production. The Croatian study examines the use of waste as biogas production and fertiliser, the Russian study examines the heat and electricity generation potential of urban wood waste, and the Turkish study examines different methods of energy recovery from household waste. These studies emphasise the importance of utilising various waste sources for energy production.

A review of the literature reveals that studies have generally evaluated a single renewable energy source or a limited number of sources, and the utilisation of biomass has generally been limited to waste incineration or limited-scale biogas production. The originality of this study lies in its assessment of multiple renewable energy sources (solar, wind and biomass) with an integrated approach in the Ali Nihat Gökyiğit (ANG) Botanical Garden of Artvin Çoruh University (AÇÜ). In particular, the originality of the study lies in evaluating the potential of local biomass resources such as pruning waste and food waste for biogas production both by incineration and anaerobic digestion. In conclusion, the aim of this study is to propose an economically feasible and environmentally friendly renewable energy system design that can meet the energy needs of the ANG Botanical Garden by providing a more comprehensive approach compared to the existing literature and to set an example for other public institutions.

2 Materials and methodology

2.1 Study area

Artvin Çoruh University was established by Law No. 5662 dated 17 May 2007 and has campuses in Artvin Centre (Seyitler Campus, Central Campus and ANG Botanical Garden) and in Arhavi, Hopa, Borçka, Şavşat and Ardanuç districts. The focus of this study is the 143 decare ANG Botanical Garden, which is located within the borders of Salkımlı village of Artvin Centre and opened in 2022 (Figure 1). The aims of the garden include the conservation and promotion of plant gene resources in Türkiye, scientific research in various fields, and the collection of plants used for different purposes in thematic gardens. The garden has indoor areas such as 1,164.32 m^2 Administrative and Research Building, 390.41 m^2 Café, 241.5 m^2 Conference Hall, 1064.38 m^2 Guest House, 452 m^2 R&D greenhouse and 200 m^2 production greenhouse. The electricity installed power of the garden is 250 kW and the contract power is 150 kW. Due to its distant location from Salkımlı village, it is far away from the existing low voltage network. Although the current 150 kW contract power is sufficient for the time being, additional grid investments may be required to meet future energy needs.



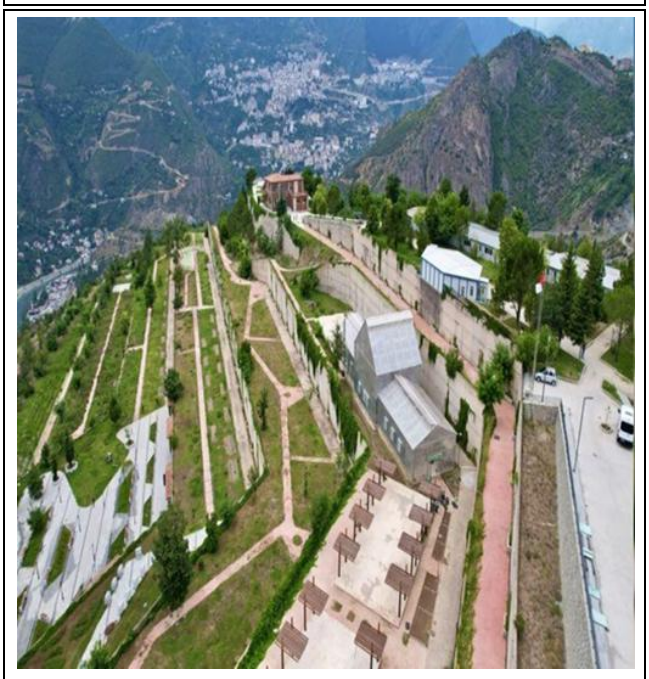


Figure 1. ANG botanical garden.

2.2 Material and method

2.2.1 Wind energy

The assessment of the wind potential for Artvin province has been performed with the wind rose data (Figure 2) created using Lakes Environmental software. The analysis showed that the dominant wind direction is west and west-northwest, and wind speeds are mostly between 0.50-3.60 m/s. The average wind speed is determined as 1.87 m/s, and 12.09% of the data corresponds to calm wind conditions, which is below 0.50 m/s. Wind speeds above 11.10 m/s are rarely observed. These results reveal that low wind potential prevails in the region.

In the analysis of wind data required for the calculation of the energy to be obtained from a wind turbine, probabilistic approaches such as Weibull, Rayleigh, Gamma and Lognormal are used to account for the variable nature of the wind.

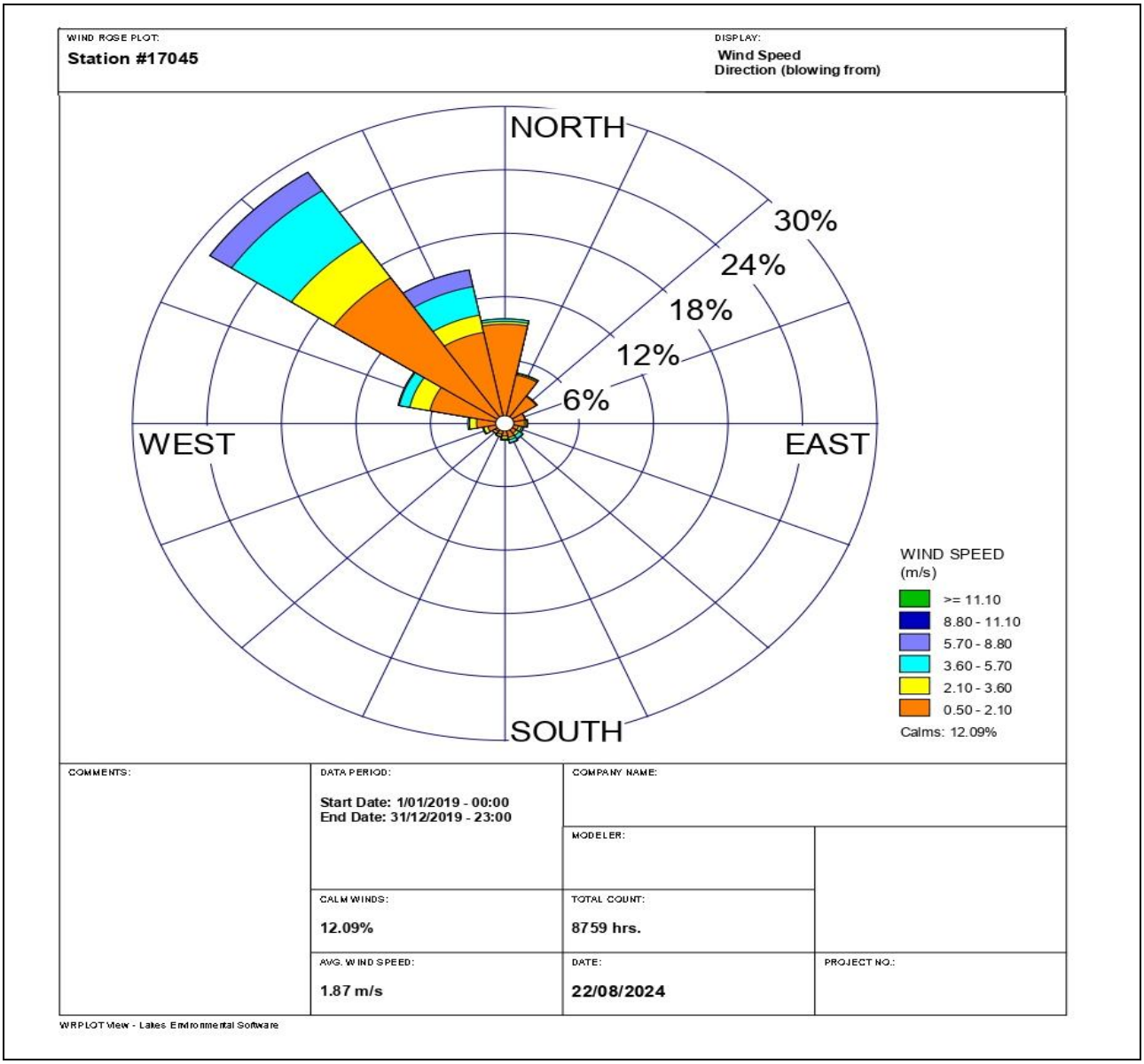


Figure 2.Wind rose belonging to Artvin city center.

In the literature, the Weibull distribution function [11], which has the highest accuracy, is commonly preferred. This function is defined over the wind speed (v), shape parameter (k) and scale parameter (c) and is given in Equation (1).

$$f(V,k,c) = \frac{k}{c}.\left(\frac{V}{c}\right)^{k-1}.e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^{k}} \quad (1)$$

Weibull distribution parameters (shape and scale) were calculated with MATLAB program using hourly wind speed data for 2017-2018 obtained from Artvin Meteorology Directorate. In the analysis, 12-month data covering January-December have been used, and instead of a total of 8760 hours of data (365 days x 24 hours), 8256 data were used due to measurement deficiencies (Table 1). Hours where measurements could not be made and wind speeds with a value of "0" were excluded from the analysis.

Table 1. Number of monthly wind speed data used for Weibull distribution analysis (Artvin Meteorology Directorate).

Months	Number of hourly data
January	688
February	649
March	728
April	696
May	730
June	695
July	744
August	726
September	602
October	704
November	646
December	648
Total	8256

Wind turbine power curves are obtained by manufacturers as a result of tests conducted at different wind speeds and are presented in catalogs [12]. Considering the low average wind speeds obtained for Artvin province, a small turbine with a power of 5 kW (Soyut Wind 5 kW model) was selected. The power curve and other technical specifications of this turbine were taken from the manufacturer's catalog and are presented in the Appendix A (Figure A1 and Table A1).

Wind source and wind turbine are required for electrical energy production using wind energy. The power of the wind turbine is the function (P(v)) that varies with the wind speed (v). Using the Weibull distribution function (f(v)), the wind turbine power is calculated by the integral in Equation (2) [13].

$$P = \int_0^{\infty} P(v) f(v) dv \tag{2}$$

Wind turbines start operating above a certain cut-in speed (V_{Cin}) and the power generation increases until the nominal speed (Vn). At the nominal speed (V_n), the nominal power (P_n) is generated. At higher speeds, the power generation remains constant. At wind speeds above the cut-off speed (V_{Cout}), the turbine cuts the generation off [13]. Due to the variability of wind speed, the average power production (P_{mean}) is calculated using the Weibull distribution as shown in Equation (3).

$$P_{mean} \rightarrow \begin{cases} v < V_{Cin} \rightarrow P_{mean} = 0 \\ V_{Cin} \leq v < V_n \rightarrow P_{mean} = P(v) \\ V_n \leq v < V_{Cout} \rightarrow P_{mean} = P_n \\ V_{Cout} \leq v \rightarrow P_{mean} = 0 \end{cases} \tag{3}$$

The ratio of the energy produced during a certain period to the energy that can be obtained by continuous nominal power generation gives the capacity factor. The capacity factor is calculated by Equation (4)-(7) [11].

$$CF = \frac{P_{mean}}{P_n} \tag{4}$$

$$CF = \frac{1}{P_n} \int_0^{\infty} P(v) f(v) dv \tag{5}$$

$$P_{mean} = \int_{V_{cin}}^{V_n} P(v) f(v) dv + P_n \int_{V_n}^{V_{cout}} f(v) dv \tag{6}$$

$$CF = \frac{1}{P_n} \int_{V_{cin}}^{V_n} P(v) f(v) dv + \int_{V_n}^{V_{cout}} f(v).dv \tag{7}$$

To model the speed-power curve of the "SoyutWind 5 kW" wind turbine, a 6th degree polynomial equation has been obtained with 99% accuracy using the curve fitting method in MATLAB (Equation (8)).

$$P(v) = 2.041 * 10^{-5} * v^6 - 0.0006953 * v^5 + 0.006779 * v^4 - 0.007173 * v^3 - 0.1083 * v^2 + 0.4223 * v - 0.337 \tag{8}$$

In MATLAB, the shape (k) and scale (c) parameters for the Weibull distribution function (f(v)) have been calculated using the available wind speed data. Using these parameters, the f(v) function, which depends only on the wind speed (v) variable, expressed as in Equation (9).

$$f(v) = 0.6481 * \left(\frac{v}{2.0067}\right)^{0.3006} * e^{-\left(\frac{v}{2.0067}\right)^{1,3006}} \tag{9}$$

As a result, the average power generation (P_{mean}) of the wind turbine is expressed as in Equation (10).

$$P_{mean} = \int_3^{10} (2.041 * 10^{-5} * v^6 - 0.0006953 * v^5 + 0.006779 * v^4 - 0.007173 * v^3 - 0.1083 * v^2 + 0.4223 * v - 0.337) \left(0.6481 * \left(\frac{v}{2.0067}\right)^{0.3006} * e^{-\left(\frac{v}{2.0067}\right)^{1,3006}}\right) dv + 5 \int_{10}^{24} \left(0.6481 \left(\frac{v}{2.0067}\right)^{0.3006} * e^{-\left(\frac{v}{2.0067}\right)^{1.3006}}\right) dv \tag{10}$$

2.2.2 Solar energy

Türkiye has significant solar energy potential due to its geographical location. According to the Ministry of Energy and Natural Resources, Solar Energy Potential Atlas [14], the annual average sunshine duration is 2741 hours, and the annual total radiation is 1527.46 kWh/m^2. The sunshine durations of Artvin province are below the Turkish average (Appendix B-Figure B1). Considering the southern location of the garden, two potential solar panel installation areas (Appendix B – Figure B2-3) were simulated using PVSOL Premium 2021 (R8)(demo version) software. Using Google Maps integration and 1991-2010 climate data (Appendix B-Figure B4), a system with a total installed power of 210.8 kW was designed. These designs were arranged in 3D on the simulation programme with the help of previously loaded climate data and Google Maps integration.

Solar energy system equipment such as PV panels and inverters are included in the relevant section of the simulation programme with current companies and brands. In the relevant section of the simulation programme, CW Energy's CWT400-72PM (400W) model solar panels and inverters belonging to Huawei Technologies were installed in two polygon areas (Polygon 01 and Polygon 02). The areas specified for installation are flat surface areas without slope. The placement of the panels is designed to be south facing (180°) with a 15° tilt angle for minimum shading. A total of 527 PV modules (210.8 kWp) are planned to be installed, 322 PV modules (128.8 kWp) in Polygon 01 and 205 PV modules (82 kWp) in Polygon 02.

The solar power plant project has an investment period of 25 years and an average annual return on capital of 33%. Polygon 01 area has an automatic/programmed connection with a single inverter and 10 MPPT devices and Polygon 02 area has an automatic/programmed connection with two inverters and 4 MPPT devices to each inverter. The unit price of electrical energy was determined as 2.1983 TL/kWh according to EMRA (EPDK) tariffs as of 03.07.2023 and covers the period 02.11.2022-01.11.2047 [15]. Solar energy installation cost is calculated as 700 USD/kW (18.221 TL/kW - 03.07.2023 1 USD = 26,03 TL). The inflation rate is determined as 19.63% based on TUIK PPI data (electricity, transmission and distribution services) for 2013-2023 [16]. This rate was calculated taking into account the fluctuations in the markets due to the COVID-19 pandemic, the Russia-Ukraine war and the Kahramanmaraş earthquake.

2.2.3 Biomass energy

Samples were taken to evaluate the energy potential of biomass wastes from plant cultivation and landscape maintenance in the ANG Botanical Garden. It was calculated that approximately 3500-5000 kg of biomass is generated by the annual pruning of various trees in the garden. Prior to autumn 2023 pruning, a sample of a mixture of shoots of fig, apple, pomegranate, peach, walnut, blackthorn, rose, willow, acacia, thuja and firethorn was collected, cut into 10 cm pieces (chopping) and dried naturally (Appendix C-Figure C1).

Woody and herbaceous plant pruning wastes generated as a result of plant cultivation and maintenance in the Botanical Garden are a potential source of biomass for energy production through incineration. In addition, an analysis was conducted to evaluate the daily food waste generated from the dining halls in all campuses of Artvin Çoruh University for energy production. According to the data of the Department of Health, Culture and Sports of AÇÜ, 143378 lunches were served in 2023 and approximately 27088 kg (54016 litres) of organic waste was generated. These food wastes were analysed together with biomass wastes to increase the total energy potential.

Prior to elemental analysis, the samples were dried in a JSR JSOF-400T oven at 70°C for 48 hours and ground to a size of 1 mm in the laboratory of the Faculty of Forestry, AÇÜ. A separate drying process was carried out for moisture content determination. A sample of 55.47 g of twigs and 7.8 g of leaves, weighed on a RADWAG PS4500.R2 precision balance, was dried at 105°C for approximately 24 hours. Moisture content (%M) was calculated using Equation (11) [17].

$$M(\%) = \frac{m_{first} - m_{last}}{m_{last}} * 100 \quad (11)$$

After drying for 48 hours, the samples were ground with a LAVION HC-1500Y grinder, sieved through a 1 mm mesh sieve and prepared for elemental analysis in the laboratory of the Faculty of Forestry, AÇÜ. Elemental analysis was carried out at Van Yüzüncü Yıl University Science Application and Research Centre using a Thermo Scientific Flash 2000 CHNS/O analyser. Samples of approximately 2.250 mg were used. All analyses were performed in 3 repetitions and the average values were used in the calculation.

The higher heating value (HHV) of biomass was calculated by seven mathematical models given in Table 2 using the elemental analysis results [18]-[21].

Table 2. Higher heating value estimates based on elemental analysis results [18]-[21].

Model No	Equality (MJ/kg)
1	HHV = 0.3259C + 3.4597
2	HHV = -3.147 + 0.468C
3	HHV = 5.736 + 0.006C^2
4	HHV = -2.907 + 0.491C - 0.261H
5	HHV = -5.290+0.493C + 5.052H^{-1}
6	HHV = -3.440 + 0.517(C +N)-0.433(H +N)
7	HHV = -3.393 + 0.507C - 0.341H + 0.067N

3 Results and discussions

The ANG Botanical Garden's current electricity installed capacity is sufficient to meet the instantaneous demand. However, the isolated location of the campus may make grid infrastructure investments difficult in case of an increase in future energy demand. Therefore, within the scope of the study, the integration of wind, solar and biomass energy sources was evaluated and various project proposals were developed. The energy consumption data for 2021-2023 (Table 3) is taken as a basis for this evaluation and interpretation of the results.

Table 3. ANG Botanical Garden electricity consumptionvalues in the period of the years 2021-2022-2023 (kWh).

Months	2021	2022	2023
January	6276	6494	6624
February	6257	5957	6166
March	7908	6514	7343
April	3804	4293	6378
May	5397	4278	6756
June	2906	3734	6568
July	2634	3510	6944
August	2731	5566	6324
September	3056	6071	5294
October	4379	5937	5622
November	6702	5618	8103
December	8810	6127	8787
Total	60860	64099	80909

3.1 Wind Energy

Using hourly wind speeds for a 12-month period, the average power value of the wind turbine was found to be 0.0845 kW according to the result of the integral expression of the product of the Weibull distribution function and the turbine power curve equation (Equation (12)). The reasons for this low value are that the turbine used should generate power at a minimum wind speed of 3 m/s and the hourly wind speeds in the region are generally less than 3 m/s.

$$P_{mean} = 8.2992 * 10^{-2} + 1.5546 * 10^{-3} = 0.0845\ kW \quad (12)$$

The nominal power of the wind turbine used in the study is 5 kW. The result obtained is 0.0845 kW. Accordingly, the capacity factor is found to be 1.69% (Equation (13)). This value is a very small value even below 10%.

$$CF = \frac{P_{mean}}{P_n} = \frac{0.0845}{5} = 0.0169 \Rightarrow \%\text{CF} = 1.69\% \quad (13)$$

The capacity factor value calculated for wind energy using the sample wind turbine is very small. In this case, generating electricity from wind energy in the region will not be an appropriate method considering the investment costs.

In 2019, in a similar study [22] conducted for AÇÜ Seyitler campus, it was concluded that Artvin province is not at a sufficient level in terms of wind energy potential. In this study, wind speed data were taken from the meteorological directorate. The real and net energy equivalent of wind energy will only be possible if wind speed measurements are measured hourly for at least one year in the planned area and calculations are made accordingly.

In studies on wind energy, due to the central locations of public spaces, suggestions such as producing energy in different places and either directly transporting the energy to the planned areas or making a protocol with a grid connection [3]-[5] have been presented. Since the ANG botanical garden is far from the settlement, there is no environmental factor in wind turbine installation. On the contrary, with the necessary measurements made, several wind turbines to be installed in various parts of the campus will add a different visual beauty in the campus landscape.

Wind energy use and applications have been on an increasing trend since 2000s. Many small-scale sample applications are carried out in public buildings and private buildings. However, even the installation cost of a small turbine with a power of 10 kW together with other equipment can exceed 15000 dollars (calculated average value). For this reason, it would be more appropriate to plan and project wind energy as a hybrid system.

3.2 Solar energy

The system design project was obtained by adjusting the conditions of the place where the photovoltaic (PV) system will be installed in the most realistic conditions possible in PVSOL programme. With the installation of the selected PV panels in the determined areas, a total of 1052.9 m² surface area PV panels were installed. The installed power was found to be 210.8 kW. 527 PV panels were used and 3 inverters were connected to the grid (Table 4).

Table 4. 3D grid connected PV system technical information.

Climate Data	Salkımlı, TUR (1991-2010)
PV Generator Output	210.8 kWp
PV Generator Surface	1052.9 m²
Number of PV Modules	527
Number of Inverters	3

The annual energy production of the PV system under the specified and adjusted conditions is 256900 kWh and the system performance is 81.5%. The annual efficiency reduction due to shading is 6.6% and the annual CO2 emission value reduced and prevented is 123.5 tonnes (Table 5).

Table 5. 3D grid connected PV system's yield table.

PV Generator Energy (AC grid)	256900 kWh
Grid Feed-in	256900 kWh
Down-regulation at Feed-in Point	0 kWh
Own Power Consumption	0 %
Solar Fraction	0 %
Spec. Annual Yield	1218.34 kWh/kWp
Performance Ratio (PR)	81.5 %
Yield Reduction due to Shading	6.6 %/Year
CO_2 Emissions avoided	123534 kg/year

The total cost of the project was calculated by the programme according to the unit prices entered and found as 3,840,986.80 TL (700USD/kW). The asset return rate of the system is 41.8% and the amortisation period is 8.8 years. 1 kWh energy production cost is 5.24 TL (Table 6).

Table 6. 3D grid connected PV system gain status and financial analysys.

Total investment costs	3840986.80 ₺
Return on Assets	4180 %
Amortization Period	8.8 Years
Electricity Production Costs	5.24
Energy Balance/Feed-in Concept	Full Feed-in

In the PVSOL simulation programme, the profitability of the system according to the annual production in the time period entered for financial analysis was calculated by the programme and the results in Table 7 were obtained. The cash flow graph in Figure 3 shows the graphical curve of these results. Starting from the 8th year, the system amortises the investment cost and enters the profitability period. As of the 25th year, only operating expenses are deducted and the production cost continues in a constant direction.

Table 7. Cash flow values of PV System according to the years.

Years	Cash Flow (TL)	Years	Cash Flow (TL)
1	-3348633,23	14	1172797,04
2	-2761578,05	15	1341724,98
3	-2232019,05	16	1495857,28
4	-1753360,23	17	1636518,21
5	-1319967,96	18	1764906,77
6	-926993,14	19	1882110,05
7	-570231,65	20	1989114,96
8	-246014,04	21	2086818,32
9	48881,98	22	2176035,81
10	317301,56	23	2257509,91
11	561769,08	24	2331916,77
12	784533,99	25	2399872,55
13	987608,2	26	2429522,07

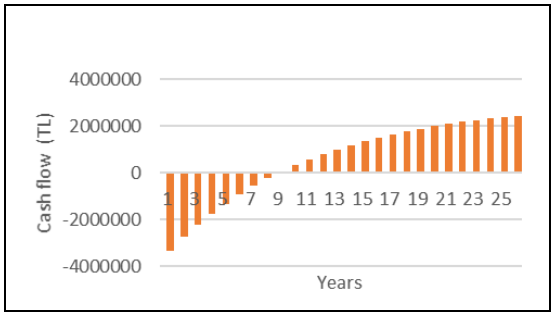


Figure 3. Cash flow curve graphic of the system.

The ANG Botanical Garden consumed 60680 kWh of electrical energy in 2021, 64099 kWh in 2022 and 80909 kWh in 2023 (Table 3). It is seen that there is an increasing energy demand. The designed solar energy system is capable of meeting this need with an annual production capacity of 256900 kWh.

Solar energy has been widely used in applications other than electrical energy generation until the 2010s. Today, there are examples of all uses of solar energy worldwide. Researches and studies in the literature [3]-[5],[23] emphasise the importance of the use of solar energy. There are many studies and applications on solar energy and renewable energy in the relevant departments of universities in Türkiye. In public buildings, systems that will pay for themselves between 5-10 years on average are designed with campus-based or building-based projects. With the widespread use of solar energy, solar energy systems are also becoming widespread and system unit costs are becoming accessible and applicable.

3.3 Biomass energy

The results of the elemental analyses of the biomass sample with three repetitions are given in Table 8. C (carbon), H (hydrogen), N (nitrogen), O (oxygen) and S (sulphur) ratios of each sample were obtained as a result of the analysis. The amount of oxygen was found by subtracting the sum of other elements from 100.

C, H and O are the biomass elements that make up the components of the organic part of the fuel. Carbon makes the most important contribution to combustion. In general, among the wastes that make up biomass wastes, woody biomass has a carbon content of 47% and mixed biomass has a carbon content of 46-47%. Agricultural biomass has a lower carbon content of 45% [24]. As can be seen from Table 8, the carbon content of the mixture of various woody pruning wastes used in this study is close to 46%. Accordingly, it can be said that it would be more convenient to use the mixture in incineration.

Table 8. Results of elemental analysis of ANG botanical garden pruning waste.

	Analysis 1	Analysis 2	Analysis 3	Average
Sample weight (g)	2.34	2.23	2.18	2.25
C (%)	45.85	45.46	45.59	45.63
H (%)	5.88	5.83	5.79	5.83
N (%)	2.25	2.14	2.01	2.13
S (%)	0.00	0.00	0.00	0.00
O (%)	46.01	46.58	46.61	46.40
C/N	20.35	21.28	22.64	21.42

In determining the moisture content of the biomass, branches and leaves were evaluated separately. 55.47 g of branch samples and 7.8 g of leaf samples were taken and the moisture content of the branches was 31.25% and the moisture content of the leaves was 14.7%. The high moisture content of the tree branches is due to the fact that the trees are alive and old branches are cut for rejuvenation. The ideal moisture content of the waste in incineration should be between 15-25%. This range provides a favourable balance for the incineration process and increases the yield. This moisture content will decrease after longer natural drying.

Using the elemental analysis results of the biomass sample, the HHV values in Table 9 were found according to the HHV calculation models given in Table 2. According to this, we can say that the HHV value is 18 MJ/kg. Considering that 5000 kg of waste is generated annually, the energy equivalent of the incineration of this waste is 90000 MJ. The electrical energy (1 kWh = 3.6 MJ) equivalent of the calculated energy value corresponds to 25000 kWh. This value is a value that can meet one year's energy in a section that requires heat energy in the botanical garden. Another alternative is to burn this waste to

obtain electrical energy with a small thermal steam turbine generator. Electrical efficiency in thermal power plants is around 40%. According to this, 10000 kWh electrical energy can be obtained from 25000 kWh energy per year. Waste heat energy can also be utilised as heat energy in the field.

The value of landfill gas potential generated in waste collection areas for the population within the municipal boundaries in Türkiye is 0.97 billion m^3/year. The lower heating value of this gas is 19-23 MJ/m^3 (5.27-6.38 kWh/m^3). Based on the calculation made by taking into account that it contains 50% methane gas, 17.20 MJ/m^3 (4.77 kWh/m^3) is taken as the energy equivalent of approximately 5 kWh/m^3 [25],[26]. Based on the data obtained and calculations made, it was determined that 54016.47 litres of food waste with a volume of 54016.47 litres and 27008.235 kg of food waste is generated annually in all dining halls of AÇÜ. When food waste is stored and utilised without mixing with other municipal wastes, the energy equivalent will be higher due to its high organic matter content. Accordingly, the energy equivalent of food waste can be accepted as 5-10 kWh/m^3. Since 1 m^3=1000 litres, approximately 55 m^3 of food waste is generated from the dining halls of AÇÜ in a year. In this case, the annual energy equivalent of cafeteria waste will be in the range of 275-550 kWh.

The installed capacity of biomass energy in Türkiye has approached 2500 MW today. This corresponds to a value of 2.5 per cent. Waste management is the practices carried out to reduce the impact of waste materials on the environment and to increase the recovery of materials and energy [27]. The majority of the registered biomass power plants are established with the waste management practices of metropolitan municipalities. Others are located in provinces with agricultural and industrial production. Biomass is found wherever there is life and consumption. However, the processing and conversion of biomass into energy has not yet reached an accessible and applicable level in the world and in Türkiye. Countries with good economies in the world, similarly in Türkiye, there are energy production applications from biomass in metropolitan municipalities and provinces with large industries.

4 Conclusion and suggestions

This study presents the evaluation of local renewable resources (wind, solar and biomass) to meet the energy needs of Artvin Çoruh University ANG Botanical Garden. The wind energy potential was found to be low (average power 0.0845 kW, capacity factor 1.69%), therefore it was concluded to be uneconomical. The overall wind potential for Artvin province also appears to be insufficient. However, the geographical location of the garden requires a more detailed investigation for future wind energy production.

The designed 210.8 kW photovoltaic system has the potential to generate 256900 kWh of energy per year (approximately 1000000 kWh after deducting losses). The current energy consumption of the garden corresponds to about 10% of this value. However, due to the time mismatch between energy production and consumption (day-night, summer-winter), a grid-connected system is proposed.

Analyses of approximately 5000 kg of pruning waste per year showed that the upper heating value of the biomass was 18 MJ/kg (about 25000 kWh of heat energy). Since it is not economical to convert this heat energy into electrical energy in a thermal power plant, it is recommended to use it directly for heating purposes. The utilisation of food waste for energy production does not seem to be economically viable due to its low energy potential and operating costs. However, in the future, it is proposed to utilise catering wastes and lawn mowing wastes together for biogas production by anaerobic digestion. The biogas to be obtained can be used in the production of electricity and heat energy with a cogeneration system. In conclusion, the most appropriate and economical solution for the energy needs of the garden is the installation of a grid-connected photovoltaic system, while wind energy will be evaluated in the future after more detailed analyses and biomass will be used for heating purposes.

Table 9. Higher heating values of the samples.

Samples	HHV Mathematics Models (MJ/kg)						
	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7
Analysis 1	18.4024	18.3111	18.3497	18.0702	18.1732	17.9074	17.9986
Analysis 2	18.2744	18.1272	18.1344	17.8909	17.9883	17.7182	17.8106
Analysis 3	18.3175	18.1891	18.2067	17.9669	18.0584	17.7918	17.8814
Average	18.3314	18.2092	18.2301	17.976	18.0721	17.8052	17.8961

5 Acknowledgement

This study is derived from the master's thesis titled 'Analysis of Artvin Çoruh University Ang Botanical Garden Energy Needs to be Met From Renewable Energy Sources' conducted and accepted at Artvin Çoruh University, Graduate Education Institute, Department of Natural Resource Management.

6 Author contribution statements

This article is derived from the master's thesis as stated in the acknowledgement section. Kadir Doğanşahin has made the necessary examinations and arrangements in wind and solar energy sections. Elanur Adar Yazar conveyed her knowledge and experience on biomass energy, and waste to energy. Adalet Keskin has finalised the thesis and article with the advisory of Elanur Adar Yazar and Kadir Doğanşahin.

7 Ethics committee approval and conflict of interest statement

"There is no need to obtain an ethics committee approval for the article prepared". "There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared".

8 References

[1] Ministry of Foreign Affairs. "Yenilenebilir Enerji Kaynakları".https://www.mfa.gov.tr/yenilenebilir-enerji-kaynaklari.tr.mfa#:~:text=Yenilenebilir%20enerji%20kaynaklar%C4%B1%2C%20hidro%2C%20jeotermal,ve%20dalga%20olarak%20kabul%20edilmektedir (14.03.2023).

[2] Aktacir M, Yeşilata B. "Harran Üniversitesi kampüs İçi fotovoltaik sistem uygulamaları". *Tesisat Mühendisliği*, 111, 41-46, 2009.

[3] Kara Ö. Visualizing Energy Consumption of Yalova University with a Feasibility Research for Using Renewable Energy. MSc Thesis, Yalova University, Yalova, Türkiye, 2019.

[4] Adan HK. Technical and Economic Evaluation of a Standalone and Grid Connected Hybrid Renewable Energy System: Case study at Eskişehir Technical University. MSc Thesis, Eskişehir Technical University, Eskişehir, Türkiye, 2020.

[5] Baydar O. Renewable Energy Usage in Public Buildings: Çanakkale 112 Emergency Call Center Example. MSc Thesis, Çanakkale Onsekiz Mart University, Çanakkale, Türkiye, 2021.

[6] Raihan A, Tuspekova A. "Dynamic impacts of economic growth, renewable energy use, urbanization, industrialization, tourism, agriculture, and forests on carbon emissions in Turkey". *Carbon Research*, 1(1), 20, 2022

[7] Barwińska-Małajowicz A, Pyrek R, Szczotka K, Szymiczek J, Piecuch T. "Improving the energy efficiency of public utility buildings in Poland through thermomodernization and renewable energy sources, a case study". *Energies*, 16(10), 4021, 2023.

[8] Bedoić R, Čuček L, Ćosić B, Krajnc D, Smoljanić G, Kravanja Z, Duić N. "Green biomass to biogas-a study on anaerobic digestion of residue grass". *Journal of Cleaner Production*, 213, 700-709, 2019.

[9] Khudyakova GI, Danilova DA, Khasanov RR. "The use of urban wood waste as an energy resource". *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Sustainable Cities*, Ekaterinburg, Russia, 19 May 2017.

[10] Demirel ZD. Techno-Economic Feasibility Analysis of Raw Waste Incineration and Integrated Waste Processing Scenarios for Municipal Solid Wastes in Istanbul. MSc Thesis, Yıldız Technical University, İstanbul, Türkiye, 2022.

[11] Doğanşahin K, Uslu AF, Kekezoğlu B. "İki bileşenli Weibull dağılımı ile rüzgâr hızı olasılık dağılımlarının modellenmesi". *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (15), 315-326, 2019.

[12] "Soyut Wind Rüzgar Enerjisi Çözümleri" https://soyutwind.com/tr/urunler-proje/soyutwind-5-kw/ (29.08.2024).

[13] Oral F, Ekmekçi İ, Onat N. 2015. "Weibull distribution for determination of wind analysis and energy production". *World Journal of Engineering*, 12(3), 215-220, 2015.

[14] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. "Enerji-Güneş" https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes (15.05.2023).

[15] T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. "Elektrik" https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari (20.08.2023).

[16] Türkiye İstatistik Kurumu. "Domestic producer price index". https://data.tuik.gov.tr/Bulten/DownloadIstatistikselTablo?p=cInvH0vU9tFCMWR/ua5i0uIdKbYw2IQaF/vEevvNPXeCokaYdQoV9eIyJrqLwbFE (20.08.2023).

[17] Yıldız Z, Topkoç E. "Biyopeletlerin kısa analiz ve elementel analiz sonuçlarına göre üst ısıl değerlerinin hesaplanması". *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 24(1), 37-45, 2023.

[18] Callejón-Ferre AJ, Velázquez-Martíb B, López-Martíneza JA, Manzano-Agugliaro F. "Greenhouse crop residues: Energy potential and models for the prediction of their higher heating value". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 948–955, 2011.

[19] Yin CY. "Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses". *Fuel*, 90, 1128–1132, 2011.

[20] García R, Pizarro C, Lavín AG, Bueno JL. "Spanish biofuels heating value estimation. Part I: Ultimate analysis data". *Fuel*, 117, 1130–1138, 2014.

[21] Özyuğuran A, Yaman S, Küçükbayrak S. "Prediction of calorific value of biomass based on elemental analysis". *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 2(3), 254-260, 2018.

[22] Aydın EH. Optimization of Renewable Energy Sources Usage in Artvin Coruh University. MSc Thesis, Selçuk University, Konya, Türkiye, 2019.

[23] Özlük R. Analysis of the Relationship Between Energy Use and Space Use of Higher Education Buildings: The case of Balıkesir University. MSc Thesis, Balıkesir University, Balıkesir, Türkiye, 2021.

[24] Harun NY, Afzal MT. "Effect of particle size on mechanical properties of pellets made from biomass blends". *Procedia Engineering*, 148, 93-99, 2016.

[25] Özcan M, Öztürk S, Yıldırım M. "Türkiye'nin farkli kaynak tiplerine göre biyogaz potansiyellerinin belirlenmesi". *Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, Kocaeli, Türkiye, 12-13 Mayıs 2011.
[26] Veneziani L. "Landfill gas: turning a problem into a valuable resource". *3. Atık Teknolojileri Sempozyumu ve Sergisi*, İstanbul, Türkiye, 2-3 Kasım 2011.
[27] Salihoğlu M, Poroy Z, Salihoğlu NK. "Life cycle assessment for municipal waste management: Analysis for Bursa". *Pamukkale Univ Muh Bilim Derg*, 25(6), 692-699, 2019.

Appendix A

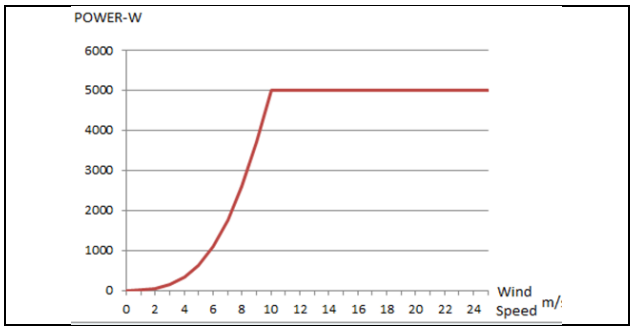


Figure A1. Power curve of the SoyutWind 5 kW model wind turbine.

Table A1. Other technical specifications of the SoyutWind 5 kW model wind türbine.

Rated Wind Speed	10 m/s
Cut-in Wind speed	3 m/s
Cut-out Wind speed	25 m/s
Rotor Diameter	6.5 m
Swept Area	33.18 m^2
Tower Height	6,5 m
Operating Temperature	-30 °C - +50 °C
Blade Type	Fiberglass Composite
Tower Type	Steel Lattice
Yaw System (Facing – Avoiding)	Furling
Gear Box	No
Control System	PLC
Brake	Electromagnetic
Alternator	3 Phase Permanent Magnet (PMG)
Voltage	220/400 VAC – 50/60 Hz
Wind Speed Sensor	Yes
Temperature Sensor	Yes
Remote Control and Monitoring	Yes
Ligtning Protection	Yes
Battery Voltage	12V – 24V – 48V

Appendix B

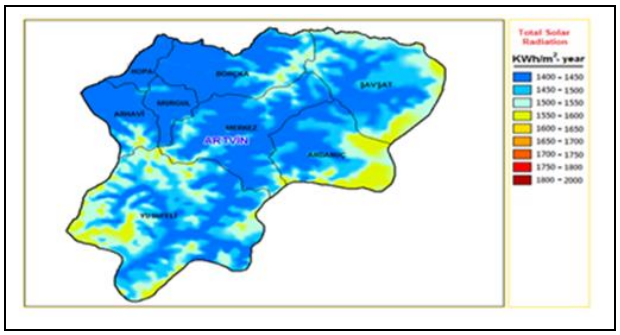


Figure B 1. Artvin potential solar energy map (ETKB).



Figure B 2. The region where solar energy installation is planned within the scope of the project.



Figure B 3. The second area, which is called a parking lot in the project and where solar energy panels can be installed.



Figure B 4. Polygon areas where the pv panels are installed.

Appendix C



Figure C 1(a): The pruning wastes in ANG botanical garden (b): Samples taken from pruning waste. (c): 10 cm chopped volume of the samples.

Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 31(7), 1277-1286, 2025

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Amazon veri setinde tüketici duygularını değerlendirmek için derin öğrenme yaklaşımı

A deep learning approach for assessing consumer sentiment in amazon dataset

Nazeeha Sayghn Khalid Khalid[1], *Serkan Savaş*[2*]

[1]Fen Bilimleri Enstitüsü, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Çankırı, Türkiye.
nazneftci18@gmail.com

[2]Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, Türkiye.
serkansavas@kku.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 29.04.2024 Düzeltme Tarihi/Revision: 12.02.2025 doi: 10.5505/pajes.2025.45753
Kabul Tarihi/Accepted: 20.03.2025 Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, Amazon ürün yorumları kullanılarak tüketici duyarlılık analizinde makine öğrenmesi tekniğinin etkinliği araştırılmıştır. Çalışmanın ana hedefi, metinsel yorumlarla ilgili yıldız puanlamaları arasındaki uyumu değerlendirmek ve bu uyumu tahmin etmek için makine öğrenimi modellerini kullanmaktır. Çalışmada, Destek Vektör Makinesi, Karar Ağacı ve K-En Yakın Komşu gibi makine öğrenmesi algoritmalarının yanı sıra Uzun Kısa Süreli Bellek gibi derin öğrenme algoritması da kullanılmıştır. Bu modellerin performansları karşılaştırılmış ve derin öğrenme modellerinde gizli katman sayısının doğruluk üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Çalışmanın bulguları, Uzun Kısa Süreli Bellek ağlarının tüketici yorumlarındaki doğal dilin karmaşıklıklarını ele almadaki etkinliğini göstermektedir. Uzun Kısa Süreli Bellek modeli, %98'lik doğruluk oranı ile test veri setinde en iyi performansı sergilemiştir. Buna karşın Karar Ağacı modeli, %77.8'lik doğruluk oranı ile en düşük performansı sergilemiştir. Bu sonuçlar, farklı makine öğrenmesi tekniklerinin duyarlılık analizindeki etkinliğine dair önemli fikirler sağlamaktadır. Ayrıca, bu sonuçlar hızla gelişen bu alanda gelecekteki araştırmalar için de önemli bir temel oluşturmaktadır.

Anahtar kelimeler: Tüketici duyarlılık analizi, Derin öğrenme, Uzun kısa süreli bellek, Amazon, Makine öğrenmesi.

Abstract

This study investigates the effectiveness of machine learning techniques in consumer sentiment analysis using Amazon product reviews. The main objective of the study is to use machine learning models to evaluate and predict the correspondence between textual reviews and the corresponding star ratings. In addition to classical machine learning algorithms such as Support Vector Machine, Decision Tree and K-Nearest Neighbor, deep learning algorithm such as Long Short-Term Memory is also used in the study. The performances of these models are compared and the impact of the number of hidden layers on the accuracy of deep learning models is analyzed. The findings of the study demonstrate the effectiveness of Long Short-Term Memory networks in handling the complexities of natural language in consumer reviews. The Long Short-Term Memory model performed best on the test dataset with an accuracy of 98%. In contrast, the Decision Tree model performed the worst with an accuracy of 77.8%. These results provide important insights into the effectiveness of different machine learning techniques in sensitivity analysis. Furthermore, these results provide an important foundation for future research in this rapidly evolving field.

Keywords: Consumer sentiment analysis, Deep learning, Long short-term memory, Amazon, Machine learning.

1 Giriş

E-ticaret ve modern lojistik, günümüzün internet çağının belirgin bir özelliği olarak hızla gelişmektedir. Wu ve diğerlerine göre, giderek daha fazla sayıda insan alışveriş tercihlerini çevrimiçi ürün satın almaya yönlendirmektedir [1]. Online alışveriş tüm yaş grupları arasında popüler olup, önemli bir kolaylık ve verimlilik sunmaktadır. Ancak, bu durum sanal bir ortamda ürünleri fiziksel olarak görememe ve ürün açıklamaları ile gerçek ürünler arasındaki tutarsızlıklar gibi sorunlara yol açabilir. Bu bağlamda ürün yorumlarının ürün değerlendirmelerinde temel bir referans olduğu belirtilmektedir [2]. E-ticaret siteleri, tüketicilerin geri bildirimlerini dikkate alarak alışveriş yapmalarını sağlar. İnternet, ürünler ve hizmetler hakkında önemli bir bilgi kaynağıdır ve milyonlarca geri bildirim üretir. Bu geri bildirimler, bir şirket hakkında detaylı görüşler sağlar ve perakendecilerin alıcıların ihtiyaçlarını göz önünde bulundurmasını kolaylaştırır. Bu da bir şirketi anlamak ve tüketicilerin tercihlerini değerlendirmek için kapsamlı bir inceleme ve analiz süreci gerektirir. Amazon, dünyanın önde gelen çevrimiçi satıcı platformlarından biridir ve detaylı ürün yorumları barındırmaktadır. Bu yorumlar, ürünlerin kalitesi ve özellikleri hakkında değerli bilgiler sağlar. Le ve Mikolov'a göre Amazon'da alışveriş yapan tüketicilerin %88'i profesyonel tavsiyeleri kontrol etmektedir [3]. Bu yorumlar, duyarlılık analizi ve doğal dil işleme teknikleri kullanılarak değerlendirilebilir. Du ve dig. tarafından gerçekleştirilen çalışmaya göre, çevrimiçi alışveriş yapan insanların %91'i bir ürün veya hizmet satın almadan önce yorumları okur [4]. Askalidis ve Malthouse, Amazon platformlarındaki ürün yorumlarının kalitesinin önemli olduğunu ve müşterilerin genellikle ilk birkaç yoruma odaklandığını belirtmişlerdir [5]. Bu durum, müşterilerin yararlı bilgileri belirlemesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, e-ticaret web sitelerindeki müşteri geri bildirimleri ve ürün yorumları, müşteri satın alma deneyimini geliştirmede ve işletmelerin ürün ve hizmetlerini iyileştirmede kritik bir rol oynamaktadır. İşletmeler, en karlı ürün ve hizmetlere odaklanarak, müşteri memnuniyetini ve sadakatini sağlamayı hedeflemektedir. Ayrıca, müşteri

*Yazışılan yazar/Corresponding author

deneyimini geliştirmeye ve olumlu görüşler teşvik etmeye odaklanırlar. Ek olarak, işletmeler ürün ve hizmetlerini geliştirmeye, iyileştirmeye ve müşteri memnuniyeti ile sadakatini artırmak için etkili stratejiler geliştirmeye odaklanmalıdır.

Bu çalışmada, Amazon ürün yorumları kullanılarak tüketici duyarlılık analizinde makine öğrenmesi ve derin öğrenme tekniklerinin etkinliği araştırılmıştır. Çalışmanın ana hedefi, metinsel yorumlarla ilgili yıldız puanlamaları arasındaki uyumu değerlendirmek ve bu uyumu tahmin etmek için makine öğrenimi ve derin öğrenme modellerini kullanmaktır. Çalışmada, Destek Vektör Makinesi (Support Vector Machine - SVM), Karar Ağacı (Decision Tree-DT) ve k-En Yakın Komşu (k-Nearest Neigbor-kNN) gibi makine öğrenmesi algoritmalarının yanı sıra Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory-LSTM) ağları gibi derin öğrenme algoritması da kullanılmıştır. Bu modellerin performansları karşılaştırmış ve derin öğrenme modellerinde gizli katman sayısının doğruluk üzerindeki etkisi analiz edilmiştir.

Çalışmanın organizasyonu şu şekilde yapılandırılmıştır: Bölüm 2 ilgili çalışmalara odaklanarak alandaki ana literatür ve gelişmelere genel bir bakış sunmaktadır. Bölüm 3, problem çözme için kullanılan metodolojileri açıklayarak, yeni yöntemlerin verimliliği ve etkinliğini vurgulamaktadır. Bölüm 4'te bu yöntemlerin belirlenen soruna uygulanmasının sonuçları sunulmuştur. Son bölümde sorunun kökeni, uygulanan metodolojiler ve bulguların potansiyel etkilerini anlamanın önemi vurgulanmıştır.

2 İlgili çalışmalar

Birçok araştırma, duygu analizi alanındaki çeşitli teknikleri ve yöntemleri inceleyerek bu metodolojilerin özelliklerini, sınırlılıklarını ve etkinliklerini analiz etmektedir. Joseph [6], geniş bir Amazon veritabanı ve önceden eğitilmiş bir BERT modeli kullanarak ürün yorumlarını analiz etmek ve sınıflandırmak için bir makine öğrenimi modeli tanıtmıştır. Bu model, geri bildirim analizinde %96.3 doğruluk elde etmiştir. Shrestha ve Nasoz [7] ise Amazon yorumları ve puanları arasındaki uyumu değerlendirmek amacıyla duygu analizini kullanmışlardır. Derin öğrenme teknikleri ve tekrarlayan sinir ağı kullanarak Amazon yorumlarını vektör temsillerine dönüştüren bu çalışmanın modeli, ortalama olarak 0.5861 kesinlik puanı ve 0.4085 hatırlama oranı elde etmiştir. Gope ve diğ. [8] de, Amazon ürün puanları ve metin yorumları üzerine duygu analizi yapmak için bir makine öğrenimi metodolojisi geliştirmiş ve RNN-LSTM yaklaşımıyla %97.52'lik en yüksek doğruluk oranına ulaşmışlardır. Wedjdane ve diğ. tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çevrimiçi yorumların akıllı telefon satışları üzerindeki etkisini inceleyen yazarlar, bu yorumları negatif/pozitif, çok negatif/çok pozitif ve nötr kategorilere ayırarak bilinçli tüketici ve üretici kararları için önemini vurgulamıştır [9]. Amazon yorum veri seti üzerinde AlZu'bi ve diğ. [10] tarafından yapılan araştırmada, kullanıcı oylama yüzdelerinin pozitif veya negatif sınıflandırma için analiz edilmesinin etkisiz olduğu ve yorum sayısı ile alınan oylar arasında ters bir ilişki olduğu ortaya koyulmuştur. Bu da daha etkili istatistiksel analiz ihtiyacını vurgulamıştır. Norinder U. ve Norinder P. tarafından gerçekleştirilen çalışmada, derin öğrenme ile doğal dil işlemenin birleştirilmesinin, on iki Amazon ürün yorumunda geçici duygunun doğru bir şekilde tahmin edilmesini sağladığı ve sınıf dengesizliklerini ele aldığı gösterilmiştir [11]. Paknejad ise çalışmasında, bilgisayar bilimlerindeki duygu analizinin hızlı büyümesine odaklanarak fikir madenciliği, metin madenciliği ve duygu analizi tekniklerinin belirli ürünler hakkındaki bireylerin tutumları üzerindeki etkisine odaklanmıştır [12]. Hamdallah çalışmasında, Amazon yorumlarındaki müşteri deneyimlerini anlamak için duygu analizi yöntemlerini kullanarak şirketlere değerli fikirler sunmuştur [13]. Du ve diğ. tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 142.8 milyon Amazon müşteri yorumu incelenmiş ve her bir yorumun yararlılığı ile önemsizliği belirlenmiştir [4]. Çalışmada özet başlıklar, ürün yorumları ve yararlılık göstergeleri analiz edilmiştir. Meenakshi ve diğ., çevrimiçi ürün yorum analizinin e-ticaretteki önemini vurgulamış ve gerçek hayattaki tüketici deneyimlerine dayanarak belirli ürünler veya hizmetler hakkında detaylı bilgi sağlama yeteneğine dikkat çekmiştir [14].

Duygu analizi, metin veya konuşmadaki duyguları tespit etmek için kullanılan bir tekniktir. Bu teknik, e-ticaret, sosyal medya ve pazarlama gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Bu literatür özeti, duygu analizi alanında yapılan bazı önemli çalışmaları analiz etmektedir. Çalışmalar, duygu analizi için kullanılan çeşitli teknikleri, bu tekniklerin sınırlılıklarını ve sonuçları belirlemedeki etkinliklerini incelemektedir. Literatürdeki ana bulgular şöyle özetlenebilir:

- Duygu analizi için kullanılan yaygın teknikler arasında makine öğrenimi, doğal dil işleme ve duygu sözlükleri yer almaktadır,
- Makine öğrenimi, duygu analizi için en etkili tekniklerden biridir,
- Duygu analizi, çevrimiçi ürün yorumları, sosyal medya gönderileri ve konuşma kayıtları gibi çeşitli veri türlerinde kullanılabilir.

Bu kapsamda, literatürdeki çalışmalar yöntem, veri seti, model performansı ve değerlendirme ölçütleri açısından analiz edildiğinde bu çalışmalardan farklı olarak çalışmamızın sunduğu yenilikler şöyle detaylandırılabilir.

Özellikle bu çalışmada:

- Literatürde genellikle yalnızca belirli bir modelin performansı ele alınırken, çalışmamız Destek Vektör Makineleri, Karar Ağaçları, k-En Yakın Komşu ve Uzun Kısa Süreli Bellek gibi farklı yaklaşımları kapsamlı şekilde karşılaştırmaktadır,
- Literatürde bazı çalışmalar sadece tek bir modelin uygulanmasına odaklanırken, bu çalışmada hiperparametre optimizasyonları gerçekleştirilmiş ve farklı modellerin doğruluk, kesinlik, geri çağırma, F1 skoru ve AUC-ROC gibi çeşitli performans metrikleriyle detaylı analizi yapılmıştır,
- Literatürde genellikle daha küçük ölçekli veri setleri ele alınırken, bu çalışmada büyük ölçekli bir Amazon veri seti kullanılmış, böylece modelin genellenebilirliği artırılmıştır,
- Çalışmamız, LSTM modelinin geleneksel makine öğrenmesi yöntemlerine kıyasla daha yüksek doğruluk oranına ulaştığını göstererek derin öğrenme modellerinin duyarlılık analizi açısından avantajlarını vurgulamaktadır.

Gelecekteki araştırmalar, duygu analizi için yeni teknikler geliştirmeye ve bu tekniklerin sınırlılıklarını ele almaya odaklanmalıdır. Ayrıca, duygu analizinin farklı veri türlerinde

ve görevlerde etkinliğini değerlendirmek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

3 Metodoloji

Bu bölümde, veri toplama, analiz ve uygulanan ardışık adımlarla birlikte metodoloji açıklanmıştır. Başlangıçta Amazon web sitesinden kullanıcı yorumları ve yıldız puanlamaları çıkarılmıştır. Bu işlem Python programlama dili ile Beautiful Soup kütüphanesinin birlikte kullanılmasıyla (veri kazıma olarak bilinen bir teknik) gerçekleştirilmiştir [15]. Bunun ardından elde edilen veriler Excel formatında (.xlsx) kaydedilmiştir. Bu çalışma üç ana aşamada yürütülmüştür. İlk aşama, veri toplama sürecini ve verilerin birleştirilmesini içerir. İkinci aşamada, web sitelerinden elde edilen metinler, Amazon web sitesine özgü ön işlemeye tabi tutulur. Son adım, elde edilen sonuçların analiz edildiği aşamadır. Çalışmanın akış şeması Şekil 1'de gösterilmiştir.

3.1 Amazon ve Veri Seti Toplama

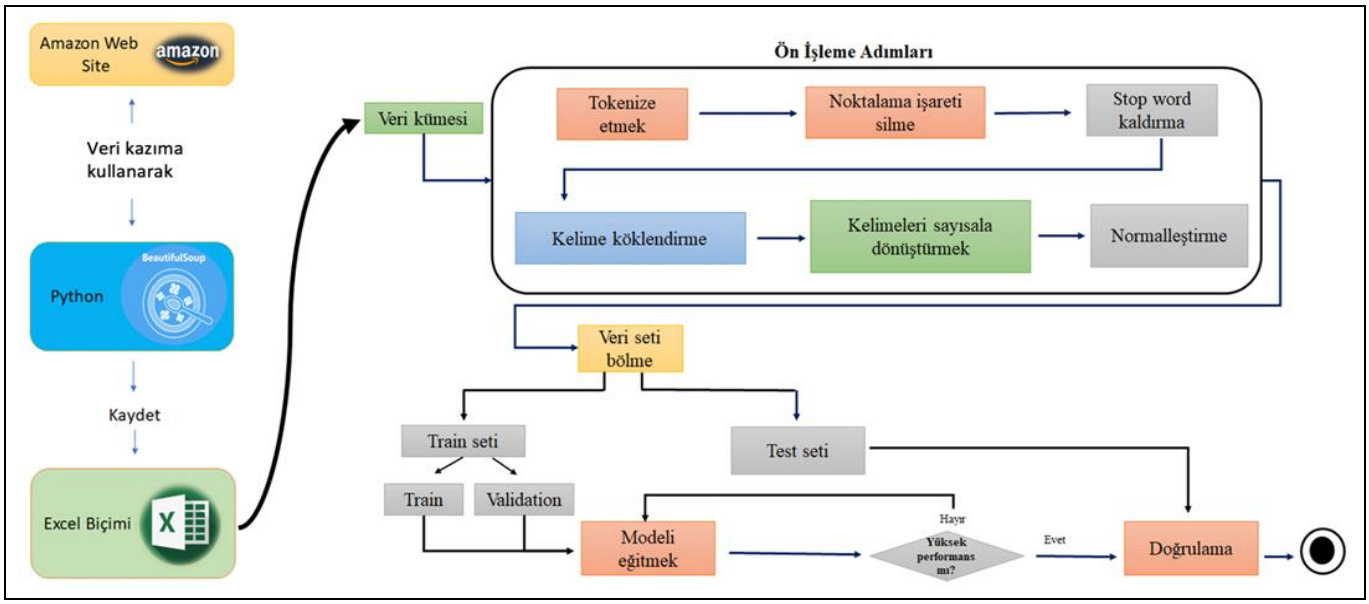
Amazon, kullanıcıların e-ticaret aktivitelerine dayanarak favori ürünlerine kolayca erişmelerini ve analiz etmelerini sağlayan bir platformdur. Platform, ürünlerin ve hizmetlerin popülaritesine ve müşteri memnuniyetine dayalı bir sıralama sistemini kullanır. Sistem, ürünleri puanlamalarına göre kategorize eder ve en yüksek ve en düşük puanlamaları sırasıyla en üst ve ilk beş olarak belirler. Platform ayrıca ürünlerin kalitesini analiz eder, en popüler ürünleri belirler ve buna göre kategorize eder. Platform, ürünlerin popülaritesinin arkasındaki nedenleri de analiz eder (örneğin hizmetin kalitesi ve ürünün kalitesi gibi). Bu analiz, en popüler ürünleri belirlemeye ve en iyi satıcıları tespit etmeye de yardımcı olur. Bu çalışmada, farklı kullanıcılardan çeşitli sayfalarda 15,000'den fazla yorum elde edilmiştir. Veri seti; Apple iPhone 11, OnePlus Nord 5G, Samsung Galaxy M31, Apple iPad 10.2 İnç Wi-Fi 32GB, Apple Watch Series 5 GPS 40mm ve Sony Xperia dahil olmak üzere on farklı cihaz için yaklaşık 15,310 içeriği kapsamaktadır. Elde edilen veriler tek bir Excel dosyasında birleştirilmiştir. Bu yorumlarda bulunan yıldız puanlamaları ve açıklamalar daha derin bir analiz için çıkarılmış ve ardından bir CSV dosyasına aktarılmıştır.

Çalışmada, veri kazıma sürecini gerçekleştirmek için kullanılan araçlar arasında öne çıkan Python'da uygulanan Beautiful Soup kütüphanesidir. Amazon'un ürün puanlama kazıyıcı tablosundan türetilen bazı veri alanları şunları içermektedir: Ürün adı, İnceleme başlığı, İnceleme içeriği/Metin, Puanlama, İnceleme yayınlama tarihi, Yazar adı ve URL.

Şekil 1'de görüldüğü gibi toplanan veri seti yapısında, sürecin ilk aşaması verileri içe aktarma, inceleme ve düzenlemedir. Bu işlemin bir parçası olarak, boş veya puanlaması olmayan satırların ortadan kaldırılması da gerekmektedir. Veri toplama yöntemindeki dengesizlik, toplanan puanlamalar ile gerçek tüketici yorumları arasındaki bir farklılığı gösteren dikkate değer bir gözlemdir. 1'den 5'e kadar değişen puanlamalar, müşteri memnuniyetinin objektif bir ölçüsü olarak yorumlanır. Burada 1 (bir) en düşük memnuniyet seviyesini ve 5 (beş) en yüksek memnuniyeti ifade ederken, 2 (iki), 3 (üç) ve 4 (dört) ise artan memnuniyeti belirtir. Analiz için, beş farklı grup oluşturan bir kümeleme yöntemi kullanılmış ve her grup, en az memnun olandan (1) en çok memnun olana (5) kadar farklı memnuniyet derecelerini temsil edilmiştir. Bu kümeleme tekniği, müşteri yorumlarındaki ürünler hakkındaki kelime benzerliklerinin analizine dayanmaktadır.

3.2 Ön işleme

Bu aşamada yorumlardan yeni satır karakterleri (\n) kaldırılmıştır. "3.0 out of 5" gibi kelimeler ve rakamlar içeren, emoji vb. karakterler yorum verilerinden çıkarılmıştır. Bu anlayışa uygun olarak, puanlamanın tam sayı olarak ifade edilmesini sağlamak için değişiklikler yapılmıştır. Birden fazla .csv dosyasından müşteri inceleme verilerini okuduktan ve birleştirdikten sonra, özelliklerin veri türleri Pandas kütüphanesinin info() fonksiyonu kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca, puanlama verilerinin veri türü gözden geçirilerek bu sütunda da düzenlemeler yapılmıştır. Bazı puanlama değerlerinin kayan noktalı biçimde (örn., '3.0') bulunduğu tespit edilmiştir. Puanlama özelliği tam sayı türüne dönüştürülmüştür.



Şekil 1. Veri seti ve sınıflandırma akış şeması.

Figure 1. Data set and classification flow chart.

Derin öğrenme veya makine öğrenimi algoritmalarının tahminlere dayalı olarak işlev görmesi için, metinsel verileri doğrudan işlemek mümkün değildir. Bu nedenle, tüm metinsel özellikler, sayısal değerleri kabul edebilen bir formata dönüştürülmelidir. Bu dönüşüm, metinleri sabit uzunlukta sayısal vektörlere dönüştürerek gerçekleştirilir. Bu vektör, metinlerin metinsel kodlamasını temsil eder. Bu dönüşüm için, Sklearn kütüphanesinin CountVectorizer fonksiyonu kullanılarak vektörler oluşturulur [16]. Bu yöntem, metinleri parçalayarak kelime dağarcığını temsil eden sayısal bir dizi oluşturur. Metin yorumları sabit uzunlukta sayısal vektörlere dönüştürülür ve ardından terim frekansı-ters belge frekansı (TF-IDF) olarak bilinen bir dönüşüme tabi tutulur. Bu dönüşüm, temel kelimelere dayalı bir derleme oluşturma ve algoritma eğitimi için veri madenciliği yapma yöntemidir [17],[18].

3.2.1 Tokenleştirme

Amazon web sitesinden elde edilen ön işlenmiş verilerden sonra, duygu analizi üzerine odaklanan analiz işlemleri gerçekleştirilmiştir. Veriler, pandas, numpy ve matplotlib gibi kütüphaneler kullanılarak Python programlama dili ile işlenmiştir. Veri yorumlarını ön işleme için doğal dil işleme (Natural Language Processing - NLP) teknikleri kullanılmıştır. Burada cümle tokenleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, kullanıcı yorumlarını analiz için ayrı cümlelere ayırmakta ve metinde anlamlı bileşenleri belirlemekte kullanılır. Python'daki NLTK kütüphanesinden sent_tokenize() fonksiyonu, metni cümlelere ayırmak için kullanılmıştır. Böylece her cümlenin içeriği ve duygusu hakkında daha detaylı bir anlayış sağlanmıştır. Şekil 2, cümleyi tokenlere ayırmak için kullanılan Tokenleştirme şemasını göstermektedir.

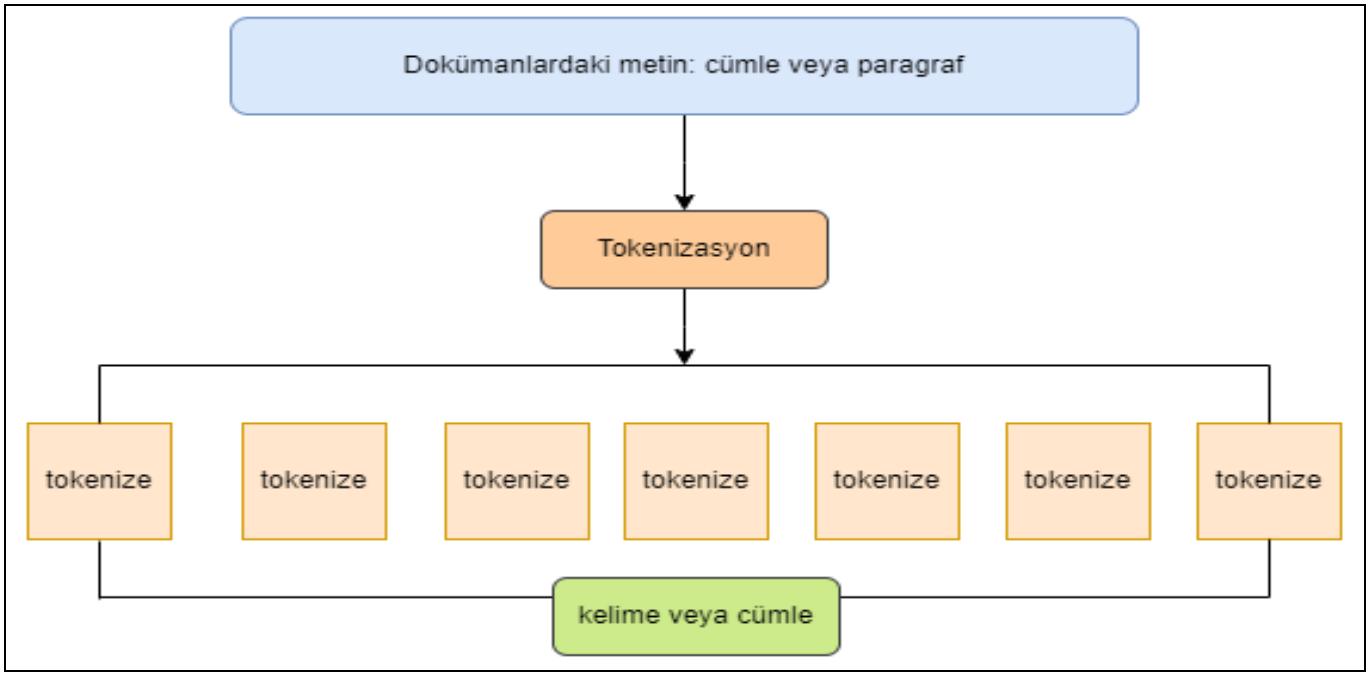
Cümle tokenleştirmenin ötesinde, yorumların ön işlenmesi, noktalama işaretlerinin kaldırılması, köklemeyi uygulama ve çeşitli kelime dönüşümleri de bu aşamada gerçekleştirilmiştir. Noktalama işaretlerini kaldırmak, özellikle duygu analizinde düzgün bir metin oluşturmada önemli bir adımdır. Çünkü bu sembollerin genellikle anlamlı bir katkı sağlamazlar. Köklemek, kelimeleri temel formlarına dönüştürerek veri içinde tutarlılık sağlamada kritik bir rol oynar. Bu süreç, aynı kelimenin farklı formlarını tek bir varlık olarak ele almayı sağlayarak, metinsel analizin bütünlüğünü korumaya yardımcı olur.

3.2.2 Noktalama işaretlerinin kaldırılması

Bu yöntem, yorumlardaki nokta, virgül, soru işareti ve ünlem gibi tüm noktalama işaretlerini ortadan kaldırarak metni standartlaştırmak ve gereksiz karakterlerin analizin doğruluğu üzerindeki olası etkisini en aza indirmek için kullanılmıştır. Dolayısıyla NLP bağlamında bu teknik, kritik bir öneme sahiptir. Noktalama işaretlerinin kaldırılması, yorumları daha temiz ve daha tutarlı bir forma sokar ve analizin sonraki adımlarını büyük ölçüde kolaylaştırır. Noktalama işaretlerini kaldırmak için çeşitli Python kütüphaneleri kullanılmıştır. Şekil 3, noktalama işaretlerinin nasıl kaldırıldığını göstermektedir.

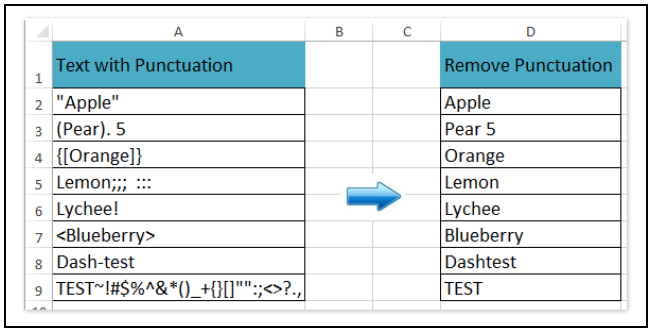
3.2.3 WordNetLemmatizer nesnesi

NLP içeren yapay zekâ projelerinde WordNetLemmatizer nesnesinin kullanımı, metin kalitesini ve sonraki analizlerin doğruluğunu artırmak için önemli bir bileşen olarak kabul edilmektedir. Gereksiz karakterlerin ve noktalama işaretlerinin kaldırılması gibi teknikler uygulandıktan sonra, WordNetLemmatizer nesnesi, metin analizi için uygun olan orijinal formata (kök kelimelerine) dönüştürmek için kullanılır. Amazon'daki kullanıcı yorumlarından türetilen metin verilerini analiz ederken, WordNetLemmatizer nesnesini kullanmak, temel kelimelerin çıkarılmasına olanak tanır. Sonuç olarak, kullanıcı yorumlarından elde edilen verilerin analizi daha verimli ve doğru bir şekilde gerçekleştirilebilir. Bu bilgiler, ürün tasarımını iyileştirmek veya müşteri hizmetlerini geliştirmek gibi alanlarda kullanılabilir.



Şekil 2. Cümleyi tokenlere ayırmak için tokenleştirme şeması.

Figure 2. Tokenization scheme for splitting the sentence into tokens.



	A	B	C	D
1	Text with Punctuation			Remove Punctuation
2	"Apple"			Apple
3	(Pear). 5			Pear 5
4	{[Orange]}			Orange
5	Lemon;;; :::			Lemon
6	Lychee!			Lychee
7	<Blueberry>			Blueberry
8	Dash-test			Dashtest
9	TEST~!#$%^&*()_+{}[]"":;<>?.,			TEST

Şekil 3. Noktalama işaretlerinin kaldırılması.

Figure 3. Removing punctuation marks.

3.2.4 CountVectorizer

Scikit-learn kütüphanesi tarafından sağlanan CountVectorizer fonksiyonu, betiklerdeki kelime temsillerini dönüştürmek için kullanılır. CountVectorizer() ile oluşturulan vector_count nesnesi, metni her kelimenin temsil sayısını içeren bir vektöre dönüştürür. Özetle, bu kod metinleri bir diziye dönüştürerek, her metindeki her kelimenin oluşumunu temsil eden vektörler oluşturur. Bu vektörler daha sonra words_feature dizisinde saklanır.

3.2.5 Normalizasyon

Çeşitli stillerde ve formatlarda çok sayıda yorumu analiz etmek, verileri karşılaştırılabilir ve analiz edilebilir bir formata dönüştürmeyi gerektirir. Normalizasyon, verileri standart bir forma dönüştürmek için kullanılır. İlk aşamada, yorumlardan gereksiz harfler ve semboller çıkarılır. Ardından, metinler belirli bir harf ve rakam kombinasyonuna dönüştürülür. Daha sonra, metinler sayılara dönüştürülür ve belirli bir aralık belirlenir. Bu, yorumlar arasında analiz ve karşılaştırma doğruluğunu artırmaya yardımcı olur. Genel olarak, normalizasyon verileri standartlaştırmada yardımcı olur ve bunları karşılaştırma ve kullanım için daha uygun hale getirir.

3.3 Veri bölme

Modelin geliştirme ve değerlendirme aşamaları için, veri seti üç ana segmente sistematik bir şekilde kategorize edilmiştir: eğitim, doğrulama ve test. Veri kümesinde ön işleme adımları uygulandıktan sonra çalışma deneyleri 8906 veri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu verilerden %40 oranında test verisi seçilerek, eğitim sürecinde modellerin görmeyeceği verilere ayrılmıştır. Veri setini %60 eğitim, %40 test olarak ayırma kararı, modelin genelleme yeteneğini artırmak ve aşırı öğrenmeyi önlemek için belirlenmiştir. Makine öğrenmesi ve derin öğrenme literatüründe, tipik olarak %70-30, %80-20 veya %60-40 gibi farklı veri bölme stratejileri kullanıldığı görülmektedir [19].

Özellikle geniş veri setlerinde, test verisinin büyük bir kısmının (%40) ayrılması modelin gerçek dünya verileri üzerindeki genelleme kapasitesini daha iyi değerlendirmek açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Paknejad çalışmasında, Amazon ürün yorumları üzerine yapılan duygu analizi çalışmalarında %60-40 veri bölme stratejisinin sıklıkla tercih edildiği ve bu bölme oranının model doğruluğunu artırmada etkili olduğu belirtilmiştir [12]. Diğer yaygın bölme stratejileriyle karşılaştırıldığında ise %70-30 veya %80-20 bölme stratejileri genellikle daha küçük veri kümeleri için önerilmektedir [20]. Ancak büyük ölçekli veri setlerinde, test kümesinin daha geniş tutulması önerilir. %60-40 bölme, büyük veri setlerinde test verisini daha geniş tutarak modelin genellenebilirliğini daha iyi değerlendirmeye olanak tanır. Bu nedenle, çalışmamızda kullanılan %60 eğitim ve %40 test bölme stratejisi hem literatürde desteklenen bir yöntemdir hem de modelin gerçek dünya verileri üzerindeki performansını daha iyi değerlendirmek için tercih edilmiştir. Kalan %60 oranındaki veriden %80'i eğitim, %20'si ise doğrulama için kullanılmıştır.

3.4 Çalışmada kullanılan modeller

Bu bölümde çalışmada kullanılan makine öğrenimi ve derin öğrenme modelleri açıklanmış, modellerin oluşturulmasında kullanılan parametreler belirtilmiştir. Parametreler, deneme yanılma yöntemine göre modellerin en iyi performans gösterdiği parametreler belirlenene kadar optimize edilmiştir.

3.4.1 Destek vektör makinesi

Destek Vektör Makinesi, sınıflandırma ve regresyonla ilgili sorunları çözmek için kullanılan güçlü bir makine öğrenimi algoritmasıdır. SVM'nin ana özellikleri arasında, veriden maksimum marjlı sapmayı belirleyen hiperparametre seçimi ve modeli daha doğru hale getirmek için çekirdek kullanılması bulunur. Ayrıca, küçük ve büyük veri kümelerinde veri sınıflandırma ve çoklu setlerde veri sınıflandırma yeteneği gibi geniş bir özellik yelpazesi sunar. SVM, finans, biyomühendislik, tıp ve cerrahi gibi çeşitli alanlarda kullanılır. Optimal hiperparametreleri modelin performansını büyük ölçüde etkiler [21],[22].

SVM modelinin performansını artırmak için CalibratedClassifierCV metodu kullanılmıştır. Bu metot, Scikit-Learn kütüphanesinde bulunan, olasılık tahminlerini daha güvenilir hale getirmek için kullanılan bir tekniktir. SVM gibi bazı sınıflandırıcılar, varsayılan olarak olasılık tahminlerini doğrudan sağlamaz. CalibratedClassifierCV, bu tahminleri kalibre ederek, daha doğru ve güvenilir olasılık değerleri elde edilmesini sağlar. Çalışmada ayrıca, çekirdek olarak kernel='rbf' (Radial Basis Function) seçilmiştir. Seçilen rbf çekirdeği, doğrusal olmayan ayrımların modellenmesi için en yaygın kullanılan çekirdek fonksiyonudur. Regularizasyon Parametresi ise C=1.0 olarak belirlenmiştir. C değeri, modelin hata toleransını belirler. Düşük C değerleri ile model daha genelleştirilebilir olur, ancak bazı hatalara izin verir. Yüksek C değerlerinde ise model hataları daha fazla cezalandırır, ancak aşırı öğrenme riski artar.

3.4.2 Karar ağacı

Karar Ağacı, önde gelen makine öğrenimi algoritmalarından bir diğeridir. Karar Ağacının ana özellikleri arasında büyük ve çeşitli veri setlerini analiz etme, müşterileri segmentlere ayırma, kredi riskini analiz etme ve pazarın çeşitli yönlerini analiz etme yeteneği bulunur [23], [24]. Veri analizi, sınıflandırma ve regresyon gibi konuları ele alır. Modelin performansı, veri kalitesi, modelin güvenilirliği, aşırı uyum riski, farklı tüketici türlerinin sayısı, modelin karmaşıklığı gibi kriterler üzerine kuruludur. Çalışmada Karar Ağacı uygulaması gerçekleştirilirken kullanılan parametreler şöyle özetlenebilir.

DT modeli, "entropy" kriteri ile oluşturulmuş ve maksimum derinliği (max_depth=3) olarak sınırlandırılmıştır. Criterion parametresi dallanma işlemi sırasında hangi ölçütün kullanılacağını belirler ve genellikle kullanılan iki temel seçenek vardır (gini ve entropy). Çalışmada her düğümde bilgi

kazancını maksimize eden bölme tercih edilmiştir. Literatürde, gini ve entropy arasında büyük performans farkları gözlenmemekle birlikte, "entropy" genellikle daha hesaplama yoğun ancak teorik olarak biraz daha iyi sonuç verebilen bir kriterdir. Maksimum derinlik parametresi ağacın derinliğini sınırlandırır. Derinlik arttıkça model daha karmaşık hale gelir ve aşırı öğrenme riski artar. Maksimum derinliğin küçük tutulması, modelin genelleme yeteneğini artırabilir ancak çok küçük bir değer de yetersiz öğrenmeye yol açabilir. Çalışmada kullanılan max_depth=3 değeri ile ağacın 3 seviye derinlikte büyüyebilmesi sağlanmıştır. Diğer parametrelerden bölme yöntemi 'best' (en iyi), düğümlerin bölünebilmesi için minimum örnek sayısı ise 2 olarak belirlenmiştir. Her bölmede kullanılacak maksimum özellik sayısına bir sınırlandırma getirilmemiştir.

3.4.3 K-en yakın komşu

K-En Yakın Komşu, makine öğrenimi uygulamalarında kullanılan temel ve etkili bir öğrenme yöntemidir. Öklid, Manhattan, Minkowski vb. gibi çeşitli uzaklık ölçütleri kullanılarak elde edilen mesafe hesaplarıyla birlikte kullanılabilir. kNN algoritmalarının özellikleri arasında basitlik, doğruluk, parametrik optimizasyon ve performans bulunur. Hem sınıflandırma hem de regresyon problemlerinde kullanılabilirler [25]. Çalışmada kNN algoritması için en önemli iki parametreden biri olan komşu sayısı (k) 3 olarak belirlenmiş, uzaklık ölçütü olarak ise Öklid uzaklığı kullanılmıştır.

3.4.4 Uzun kısa süreli bellek

Uzun kısa süreli bellek, eğitimde kullanılan derin öğrenme modelidir ve öğrenmeyle ilgili sorunları analiz etmek ve çözmek için NLP yaklaşımını kullanır. Öğrenme sürecine odaklanarak, öğrenme sürecinin altında yatan desenleri belirler ve elde edilen bilgileri depolar. LSTM'nin ana özellikleri arasında, öğrenme sürecinin bilgi akışını kontrol eden gizli kapılar bulunur. Ayrıca, öğrenme sürecinin dinamik bileşenlerini kullanarak daha karmaşık öğrenme sonuçlarına olanak tanır. LSTM, öğrenme sürecindeki sorunları bozan ve modelin performansını zayıflatan kaybolan gradyan problemi ile de ilgilenir. LSTM, çeşitli öğrenme problemleriyle başa çıkabilen güçlü bir öğrenme modelidir [26],[27]. Çalışmada oluşturulan LSTM modelinde 82 nöronlu bir katman kullanılmıştır. Giriş boyutu veriye uyarlanmış ve çıkış katmanı 3 sınıflı bir katman olarak belirlenmiştir. Çıkış katmanında Softmax aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Çalışmada batch size olarak 32 değeri kullanılmıştır. Çok sınıflı sınıflandırma problemlerinde en yaygın kullanılan kayıp fonksiyonu olan loss='categorical_crossentropy' fonksiyonu tercih edilmiştir. Optimizer parametresinde 'adam' algoritması kullanılmıştır.

3.5 Model performansı

Makine öğrenimi ve derin öğrenme modelleri, doğruluk ve verimliliklerini değerlendirmek için çeşitli performans metrikleri kullanılarak değerlendirilir. Bu metrikler arasında doğruluk, kesinlik, geri çağırma, F1 puanı ve AUC_ROC bulunur. Doğruluk (Denklem (1)), doğru tahmin edilen gözlemlerin toplam gözlem sayısına oranını ölçerek bir modelin tahmin yeteneğinin bütünsel bir ölçüsünü sağlar. Kesinlik (Denklem (2)), tahmin edilen pozitif örneklerin oranını gerçek pozitiflere karşılık gelenlerle karşılaştırarak, pozitif vakaları sınıflandırmada modelin kesinliğini ayırt eder. Geri çağırma (Denklem (3)), bir modelin gerçek pozitifleri doğru bir şekilde tanımlama yeteneğini değerlendirirken, F1 puanı (Denklem (4)) kesinlik ve geri çağırmayı uyumlaştırarak tahmin performansının dengeli bir değerlendirmesini sağlar. Son olarak, AUC_ROC metriği, bir modelin pozitif ve negatif sınıflar arasında ayırt etme yeteneğini gösterir.

$$Doğruluk = \frac{DP + DN}{DP + DN + YP + YN} \quad (1)$$

$$Kesinlik = \frac{DP}{DP + YP} \quad (2)$$

$$Geri\ Çağırma = \frac{DP}{DP + YN} \quad (3)$$

$$F1\ Puanı = \frac{2\ x\ Kesinlik\ x\ Geri\ Çağırma}{Kesinlik + Geri\ Çağırma} \quad (4)$$

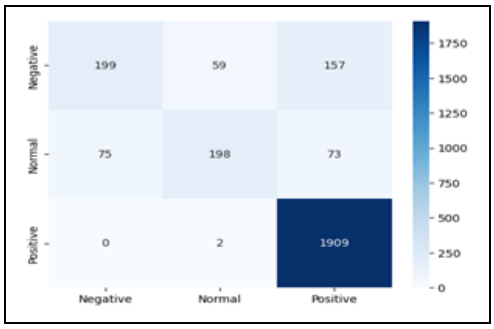
Denklemlerde doğru pozitif değerler için DP, yanlış pozitif değerler için YP, doğru negatif değerler için DN ve yanlış negatif değerler için YN kısaltması kullanılmıştır. Bu metrikler bir sınıflandırma algoritmasının performansını kapsamlı bir şekilde değerlendirerek çeşitli uygulamalardaki etkinliği konusunda bilinçli karar verme sürecini kolaylaştırır [28],[29].

4 Sonuçlar ve tartışma

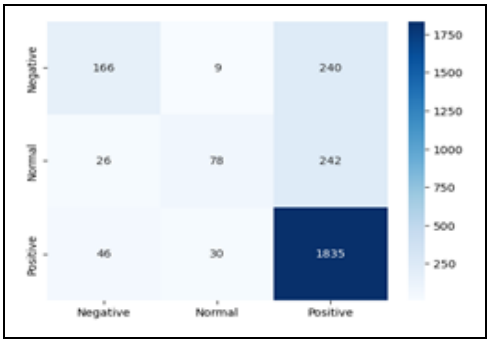
Bu bölüm, işlenmiş yorum verilerine sınıflandırma görevleri için SVM, DT, kNN ve LSTM algoritmalarının uygulanmasından elde edilen sonuçları sunmaktadır. Bu yorumlar, orijinal veri setinden türetilen ve işlem sonrası sonuçları temsil etmektedir. Farklı kategoriler arasındaki olası ilişkileri değerlendirmek için, önerilen tüm algoritmalar (SVM, DT, kNN ve LSTM) için bir karışıklık matrisi hesaplanmıştır ve Şekil 4'te gösterilmiştir.

Karışıklık matrisi, her sınıf için tahminlerin ayrıntılı bir dökümünü sunarak, doğru ve yanlış tahminler arasındaki oranı vurgular. Matristeki değerler, doğru pozitifler, yanlış pozitifler ve yanlış negatifler göstererek sınıflar arasındaki ilişkileri ve tahmin hatalarını anlamamıza yardımcı olur. SVM için olumlu yorumlarda doğru pozitif sayısı 1909, yanlış normal sayısı 2 ve yanlış negatif oranı 0'dır. Normal ve olumsuz yorumlar için sayılar, doğru ve yanlış sınıflandırmaların bir karışımını gösterir ve SVM modelinin iyi performans gösterdiği alanları ve geliştirilmesi gereken yerleri vurgular. Buna karşılık, DT modeli, yorum kategorileri arasında doğru pozitifler, yanlış pozitifler ve yanlış negatifler için farklı oranlar göstermiştir. Olumlu yorumlar için bu sayılar sırasıyla 1835, 30 ve 46'dır. Normal ve olumsuz yorumlardaki performans, modelin doğruluğundaki ve sınıflar arasındaki ayrımı yapma yeteneğindeki varyasyonu gösterir. Benzer şekilde, kNN modelinin karışıklık matrisi, olumlu yorumlar için doğru pozitif sayısı 1880, yanlış normal oranı 19 ve yanlış negatif oranı 12 olan sınıflandırma yeteneklerini ortaya koymuştur. Normal ve olumsuz yorumlar için sayılar yine, modelin çeşitli yorum türlerini sınıflandırmadaki güçlü ve zayıf yönlerine dair bilgiler sağlamaktadır. Son olarak, LSTM modeli, özellikle olumlu yorumlarda doğru pozitif sayısı 2534 olan, sıfır yanlış normal ve yanlış negatif oranları ile dikkat çekici bir doğruluk sergilemiştir. Normal ve olumsuz yorumlardaki performans bu eğilimi sürdürerek, LSTM modelinin farklı duygulara sahip yorumları doğru bir şekilde sınıflandırmada iyi bir seçenek olduğunu kanıtlamıştır. Özetle, her model duygu sınıflandırmada benzersiz güçlü yönler ve iyileştirme alanları sunmaktadır. LSTM modeli, tüm yorum türleri arasında yüksek doğrulukla öne çıkmıştır, diğer modeller ise çeşitli derecelerde etkililik gösterir. Bu bilgiler, bu algoritmaları daha da

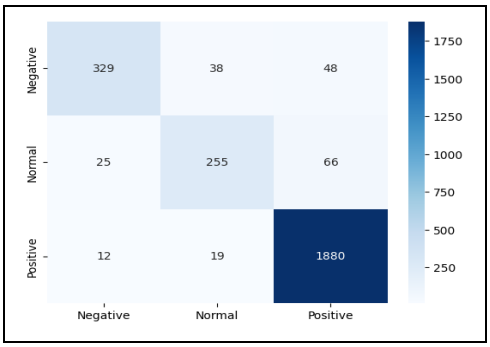
geliştirmek ve duygu analizinde uygulamalarını iyileştirmek için hayati öneme sahiptir.



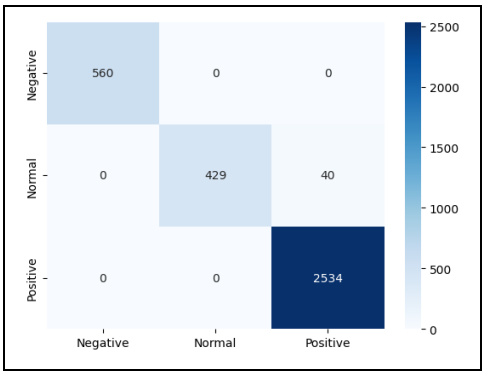
(a)



(b)



(c)

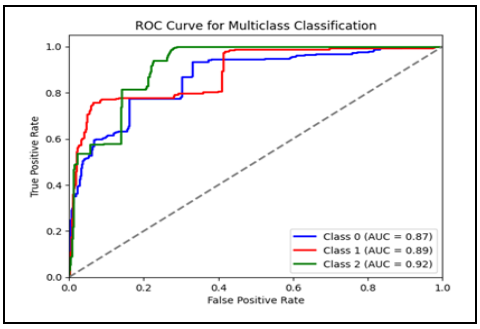


(d)

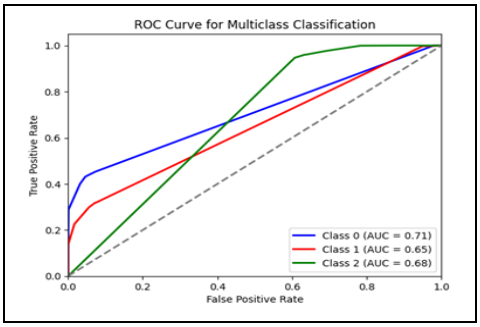
Şekil 4. Önerilen algoritmalar için karışıklık matrisi. (a): SVM. (b): DT. (c): kNN. (d): LSTM.

Figure 4. Confusion matrix for the proposed algorithms. (a): SVM. (b): DT. (c): kNN. (d): LSTM.

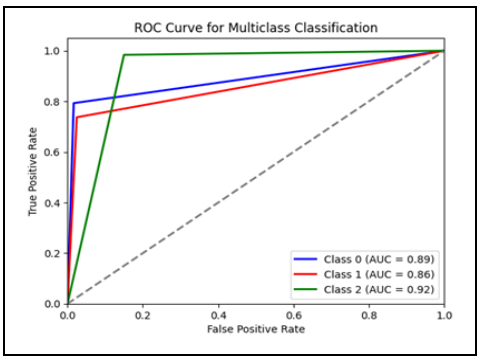
Ayrıca, çeşitli veri türleri arasında sınıflandırma modellerinin performansını değerlendirmede kritik bir ölçüm olan AUC-ROC endeksi, bu çalışmada kullanılan farklı modellerin etkinliğini doğrulamak için hesaplanarak Şekil 5'te gösterilmiştir.



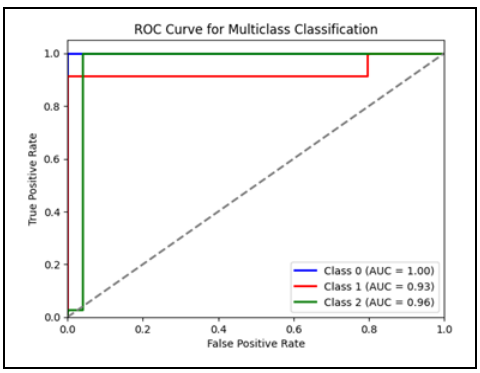
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5. Önerilen algoritmalar için ROC eğrisi. (a): SVM. (b): DT. (c): kNN. (d): LSTM.

Figure 5. ROC curve for the proposed algorithms. (a): SVM. (b): DT. (c): kNN. (d): LSTM.

Şekil 5(a)'da görüldüğü gibi SVM modeli, ROC eğrisinin yukarı ve sol yönlü eğilimiyle yüksek bir doğru pozitif oranını

vurgulamış olup bu eğitim modelin pozitif ve negatif sınıflar arasında ayrım yapma yeteneğini göstermektedir. SVM modelinin 0.87, 0.89 ve 0.92 olan AUC değerleri, modelin sınıflandırmadaki iyi yeteneğini öne çıkarmıştır. Karar Ağacı modeli söz konusu olduğunda, ROC eğrisinin hareketi benzer şekilde yüksek bir doğru pozitif oranını yansıtmıştır. Bu hareket, pozitif ve negatif sınıflar arasında kolay bir ayrım sağlamaktadır. DT modelinin 0.71, 0.65 ve 0.68 olan AUC değerleri, SVM'den daha düşük olmasına rağmen, makul bir ayrım derecesini göstermektedir. KNN modelinin performansı, ROC eğrisinin sol üst köşeye yaklaşmasıyla yüksek bir doğru pozitif oranını işaret etmektedir. Bu modelin 0.89, 0.86 ve 0.92 olan AUC değerleri, farklı sınıfları doğru bir şekilde sınıflandırmada etkinliğini vurgular. En dikkat çekici olarak, LSTM modelinin ROC eğrisi neredeyse sol üst köşeye ulaşmıştır. Bu da yüksek bir doğru pozitif oranını ima eder. Bu model, 1.00, 0.93 ve 0.96 olan AUC değerleriyle diğerlerinden daha başarılı performans sergileyerek sınıflar arasında ayrım yapma yeteneğinde üstünlüğünü göstermiştir. Son olarak, her modelin benzersiz güçlü ve zayıf yönleri vardır. Çalışmada modeller için yüksek genel doğruluk oranları elde edilmiştir: SVM için %86, DT için %77 ve kNN için %92. Bu oranlar, araştırmada kullanılan makine öğrenmesi algoritmalarından elde edilen yüksek doğruluk seviyesini göstermektedir. Ancak LSTM ile ulaşılan oran, makine öğrenmesi algoritmalarından daha başarılıdır. Bu çalışmadan elde edilen LSTM sonucu, modelin genel doğruluğunun etkileyici bir şekilde %98 olduğunu göstermiştir. Algoritmaların performansı Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Sonuç karşılaştırması.

Table 1. Results comparison.

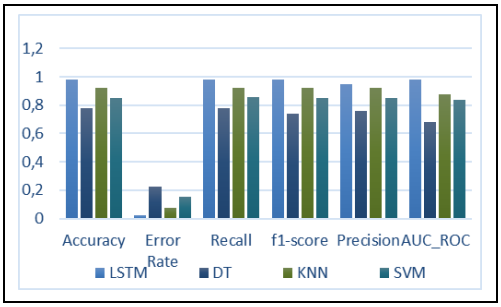
Yöntem	Doğruluk	Kesinlik	Geri Çağırma	F1 Puanı	AUC_ROC
LSTM	0.98	0.95	0.98	0.98	0.98
DT	0.778	0.76	0.78	0.74	0.68
kNN	0.922	0.92	0.92	0.92	0.878
SVM	0.85	0.85	0.86	0.85	0.841

Bu sonuçlar, Amazon yorumlarını sınıflandırmaya yönelik farklı makine öğrenimi modellerinin karşılaştırmalı analizi sunmaktadır. Elde edilen bulgular arasında dikkat çeken en önemli sonuç, LSTM modelinin %98 doğruluk oranına ulaşarak en başarılı model olarak öne çıkmasıdır. Bu üstün performans, modelin ROC-AUC eğrisi altında en geniş alanı kapsayabilme yeteneğine dayanmaktadır; dolayısıyla veri sınıflandırma doğruluğu açısından yüksek bir başarı sergilediği görülmektedir.

Buna karşın DT modeli, %77.8 doğruluk oranı ile en düşük performansı göstermiştir. Ancak, DT modelinin görece düşük doğruluk oranına rağmen, değişkenler arasındaki nedensel ilişkileri analiz etme ve modelin yorumlanabilirliğini artırma açısından önemli bir katkı sunduğu gözlemlenmiştir. Bu özellik, özellikle veri içerisindeki örüntüleri anlamanın kritik olduğu uygulamalarda Karar Ağacı modelini değerli bir araç haline getirmektedir.

Öte yandan kNN modeli, %92.2 doğruluk oranı ile dikkate değer bir performans sergilemiştir. Modelin basitliği ve hesaplama verimliliği, hızlı ve doğrudan çözümler gerektiren uygulamalar için avantaj sağlamaktadır. Benzer şekilde, doğrusal ve doğrusal olmayan ayrıştırma tekniklerini kullanan SVM modeli, %85 doğruluk oranına ulaşarak kabul edilebilir bir sınıflandırma başarısı göstermiştir. Bu sonuç, özellikle kesin ve verimli veri sınıflandırmanın önemli olduğu senaryolarda SVM modelinin etkili bir seçenek olabileceğini göstermektedir.

Bu yüksek doğruluk seviyesi, farklı kategorilerdeki verileri sınıflandırmada seçilen modellerin verimliliğini ve güvenilirliğini vurgulayarak bu modellerin pratik uygulamalardaki potansiyelini ortaya koymuştur. Şekil 6'da sağlanan grafiksel temsil, çalışmanın bulgularını karşılaştırmalı göstermekte ve her model arasındaki farkları vurgulayarak daha fazla analiz için yararlı bir referans olarak hizmet etmektedir.



Şekil 6. Karşılaştırmalı sonuçlar.

Figure 6. Comparative results.

Genel olarak, en uygun modelin seçimi, uygulamanın gereksinimlerine ve veri kümesinin özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Eğer temel hedef en yüksek doğruluk oranına ulaşmak ise, LSTM modeli en etkili yöntem olarak öne çıkmaktadır. Çalışmanın bulguları, makine öğrenimi modellerinin belirli koşullar altında iyi performans gösterebildiğini, ancak daha yüksek doğruluk oranlarına ulaşabilmek için ek çaba ve optimizasyon gerektirdiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, derin öğrenme yaklaşımlarının, özellikle LSTM algoritmasının, klasik makine öğrenimi yöntemlerine kıyasla daha yüksek doğruluk oranları sunduğu tespit edilmiştir. Modelin performansı, veri setinin genişletilmesi ve eğitim sürecinin optimize edilmesi ile daha da artırılabilir.

Bu alanda daha önce yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında, çalışmamız bazı önemli farklılıklar ve avantajlar sunmaktadır. Örneğin, Joseph çalışmasında, önceden eğitilmiş BERT modeli ile Amazon yorumları üzerinde duyarlılık analizi gerçekleştirilmiş ve %96.3 doğruluk oranı elde edilmiştir [6]. Benzer şekilde, Gope ve diğ., RNN-LSTM modelini kullanarak %97.52 doğruluk oranına ulaşmıştır [8]. Çalışmamızda ise LSTM modelinin optimize edilmesi ve geniş bir veri seti kullanılması sayesinde %98 doğruluk oranına ulaşılmıştır. Bu durum, modelin doğal dilin karmaşıklığını başarılı bir şekilde ele alabildiğini göstermektedir.

Makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlar açısından, Hamdallah çalışmasında SVM ve Naive Bayes modelleri kullanılarak duyarlılık analizi gerçekleştirilmiş, ancak doğruluk oranları %85'in üzerine çıkamamıştır [13]. Bu çalışmada ise SVM modeli %85 doğruluk oranı elde ederken, kNN modeli %92.2 ve LSTM modeli %98 doğruluk oranına ulaşmıştır. Bu sonuçlar, derin öğrenme tabanlı yöntemlerin özellikle büyük veri setlerinde daha yüksek doğruluk sağladığını göstermektedir.

Bunun yanı sıra, literatürdeki bazı çalışmalar daha küçük ölçekli veri setleriyle gerçekleştirilmiş ve farklı ön işleme teknikleri kullanılmıştır. Örneğin, AlZu'bi ve diğ., Amazon yorumlarını pozitif ve negatif olarak sınıflandırmış ancak kullanıcı oylama yüzdelerinin analizinde bazı sınırlamalarla

karşılaşmıştır [10]. Çalışmamız, farklı derecelerde duygu analizine (olumlu, nötr, olumsuz) odaklanarak daha ayrıntılı bir değerlendirme sunmaktadır.

5 Sonuç

Bu makale, müşteri sadakatini tahmin etmede Müşteri İlişkileri Yönetiminde duygu analizinin önemini vurgulamaktadır. Alışveriş alışkanlıklarına odaklanan geleneksel yöntemler genellikle müşteri sadakati sürücülerinin tam spektrumunu, örneğin memnuniyet ve ürün deneyimini yakalamada başarısız olur. Bu makale, çevrimiçi bir ortamdan çeşitli müşteri yorumlarını analiz etmek için makine öğrenimi ve derin öğrenime dayalı ileri NLP teknikleri kullanmaktadır. Çalışmada, veri toplama için Python kullanılmıştır ve Amazon'daki on elektronik cihazdan müşteri yorumlarını sınıflandırmak için kNN, SVM, DT ve LSTM gibi çeşitli algoritmalar kullanmıştır. Bulgular, bu ileri analitik tekniklerin duyguları doğru bir şekilde sınıflandırmadaki ve müşteri memnuniyeti ve sadakatini artırmadaki potansiyelini göstermektedir. Elde edilen bulgular, derin öğrenme yöntemlerinin geleneksel makine öğrenimi modellerine kıyasla daha yüksek doğruluk oranlarına ulaştığını ve tüketici yorumlarındaki duygu analizinin etkin bir şekilde gerçekleştirilebildiğini göstermektedir. Özellikle LSTM modeli, doğal dilin karmaşıklıklarını başarıyla işleyerek müşteri memnuniyeti ve sadakatini değerlendirme süreçlerinde güçlü bir araç olarak öne çıkmıştır. Bu çalışmadaki veri seti, duygu tanıma ve spam tespiti alanında daha ileri keşifler için değerli bir kaynaktır.

6 Conclusion

This paper highlights the importance of sentiment analysis in Customer Relationship Management in predicting customer loyalty. Traditional methods focusing on shopping habits often fail to capture the full spectrum of customer loyalty drivers, e.g. satisfaction and product experience. This paper uses advanced NLP techniques based on machine learning and deep learning to analyze various customer reviews from an online environment. The study uses Python for data collection and employs various algorithms such as kNN, SVM, DT and LSTM to classify customer reviews from ten electronic devices on Amazon. The findings demonstrate the potential of these advanced analytical techniques in accurately classifying sentiments and improving customer satisfaction and loyalty. The findings show that deep learning methods achieve higher accuracy rates compared to traditional machine learning models and can effectively perform sentiment analysis on consumer reviews. In particular, the LSTM model successfully handled the complexities of natural language and emerged as a powerful tool for evaluating customer satisfaction and loyalty. The dataset in this study is a valuable resource for further exploration in the field of sentiment recognition and spam detection.

7 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Nazeeha Sayghn Khalid Khalid, fikrin oluşması, tasarımın yapılması, literatür taraması, veri elde etme, analiz ve sonuçların yorumlanması, çalışmanın yazılması ve düzenlenmesi konularında katkı sağlamıştır. Serkan Savaş elde edilen sonuçların incelenmesi, sonuçların değerlendirilmesi, çalışmanın yazılması, kontrolü ve düzenlenmesi konularında katkı sağlamıştır.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur". "Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır".

9 Kaynaklar

[1] Wu F, Shi Z, Dong Z, Pang C, Zhang B. "Sentiment analysis of online product reviews based on SenBERT-CNN". *International Conference on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC)*, Adelaide, Australia, 02 December 2020.

[2] Soleymani M, Garcia D, Jou B, Schuller B, Chang SF, Pantic M. "A survey of multimodal sentiment analysis". *Image Vis Comput*, 65, 3-14, 2017.

[3] Le VQ, Mikolov T. "Distributed Representations of Sentences and Documents". *arXiv*, 2018. https://arxiv.org/pdf/1405.4053.pdf.

[4] Du J, Rong J, Michalska S, Wang H, Zhang Y. "Feature selection for helpfulness prediction of online product reviews: An empirical study". *PLoS One*, 14(12), e0226902, 2019.

[5] Askalidis G, Malthouse EC. "The value of online customer reviews". *10th ACM Conference on Recommender Systems,* Boston, MA, USA, 15-19 September 2016.

[6] Joseph RPS. Amazon Reviews Sentiment Analysis: A Reinforcement Learning Approach. MSc Thesis. Griffith College, Dublin, Ireland, 2020.

[7] Shrestha N, Nasoz F. "Deep learning sentiment analysis of amazon.com reviews and ratings". *International Journal on Soft Computing, Artificial Intelligence and Applications (IJSCAI)*, 8(1), 1-15, 2019.

[8] Gope JC, Tabassum T, Mabrur MM, Yu K, Arifuzzaman M. "Sentiment analysis of amazon product reviews using machine learning and deep learning models". *International Conference on Advancement in Electrical and Electronic Engineering, ICAEEE 2022*, Gazipur, Bangladesh, 24-26 February 2022.

[9] Wedjdane N, Khaled R, Okba K. "Better decision making with sentiment analysis of amazon reviews". *International Conference on Information Systems and Advanced Technologies (ICISAT)*, Tebessa, Algeria, 27-28 December 2021.

[10] AlZu'bi S, Alsmadiv A, AlQatawneh S, Al-Ayyoub M, Hawashin B, Jararweh Y. "A brief analysis of amazon online reviews". *Sixth International Conference on Social Networks Analysis, Management and Security (SNAMS)*, Granada, Spain, 22-25 October 2019.

[11] Norinder U, Norinder P. "Predicting amazon customer reviews with deep confidence using deep learning and conformal prediction". *Journal of Management Analytics*, 9(1), 1-16, 2022.

[12] Paknejad S. "Sentiment classification on Amazon reviews using machine learning approaches". KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweeden, Degree Project in Technology, DD142X, 2018.

[13] Hamdallah AR. Amazon Reviews Using Sentiment Analysis. MSc Thesis. Rochester Institute of Technology, Dubai, 2021.

[14] Meenakshi, Banerjee A, Intwala N, Sawant V. *Sentiment Analysis of Amazon Mobile Reviews*. Editors: Tuba M, Akashe S, Joshi A. ICT Systems and Sustainability, 43-52, Singapore, Springer Singapore, 2020.

[15] Richardson L, "Beautiful Soup Documentation". https://www.crummy.com/software/BeautifulSoup/bs4/doc/ (10.02.2025).
[16] Athanasiou V, Maragoudakis M, Kermanidis KL, Makris C, Mylonas P, Sioutas S. "A novel, gradient boosting framework for sentiment analysis in languages where NLP resources are not plentiful: a case study for modern greek". *Algorithms*, 10(1), 34, 2017.
[17] Gündüz AB, Yavuz AG. "Comparative analysis of word vectoring methods for malware detection". *29th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, İstanbul, Türkiye, 09-11 June 2021.
[18] Salur MU, Aydın İ, Jamous M. "An ensemble approach for aspect term extraction in Turkish texts". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(5), 769-776, 2022.
[19] Hastie T, Tibshirani R, Friedman J. *The Elements of Statistical Learning: Data Minin, Inference, and Prediction*. 2nd ed. New York, USA, Springer, 2009.
[20] Brownlee J. *Machine Learning Mastery with Python: Understand Your Data, Create Accurate Models, and Work Projects End-to-End*. v1.20 ed. Melbourne, Australia, Independently Published, 2021.
[21] Karakış R. *Destek Vektör Makinesi*. Editors: Savaş S, Buyrukoğlu S. Teori ve Uygulamada Makine Öğrenmesi, 93-118, Ankara, Türkiye, Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti., 2022.
[22] Güler O. "Turbofan motorlarının kestirimci bakımında makine öğrenimi algoritmaları performanslarının karşılaştırılması". *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(1), 99-106, 2024.
[23] Tuğal İ. *Karar Ağaçları*. Editors: Savaş S, Buyrukoğlu S. Teori ve Uygulamada Makine Öğrenmesi, 119-148, Ankara, Türkiye, Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti., 2022.
[24] Yavuz ÖÇ, Calp MH, Erkengel HC. "Prediction of breast cancer using machine learning algorithms on different datasets". *Ingeniería Solidaria*, 19(1), 1-32, 2023.
[25] Bütüner R, Calp MH. *K-En Yakın Komşu Algoritması*. Editors: Savaş S, Buyrukoğlu S. Teori ve Uygulamada Makine Öğrenmesi, 223-250, Ankara, Türkiye, Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti., 2022.
[26] Bilen B, Horasan F. "LSTM Network based Sentiment analysis for customer reviews". *Politeknik Dergisi*, 25(3), 959-966, 2022.
[27] Zeybel Peköz A, İnkaya T. "Derin öğrenme ile talep tahmini: Bir üçüncü parti lojistik firması için COVID-19 döneminde vaka analizi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29(4), 331-339, 2023.
[28] Horasan F, Yurttakal AH, Gündüz S. "A novel model based collaborative filtering recommender system via truncated ULV decomposition". *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 35(8), 101724, 2023.
[29] Ayan E. "Using a convolutional neural network as feature extractor for different machine learning classifiers to diagnose pneumonia". *Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences*, 5(1), 48-61, 2022.

Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 31(7), 1287-1298, 2025

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Localization evaluation of CAM based explainability techniques for plant disease detection

Bitki hastalığı tespiti için CAM tabanlı açıklanabilirlik yöntemlerinin yerelleştirme değerlendirmesi

Duygu Sinanç Terzi[1*]

[1]Department of Digital Game Design, Faculty of Applied Sciences, Ankara University, Ankara, Türkiye.
duyguterzi@ankara.edu.tr

Received/Geliş Tarihi: 01.10.2024 Revision/Düzeltme Tarihi: 09.04.2025 doi: 10.5505/pajes.2025.50955
Accepted/Kabul Tarihi: 20.05.2025 Research Article/Araştırma Makalesi

Abstract

In recent years, computer vision technologies have played a critical role in precision agriculture, leveraging robotics and artificial intelligence to automate tasks in crop production. While image-based applications hold promise, model interpretability remains a significant challenge. Explainable artificial intelligence aims to address this by providing plant scientists with interpretable, reliable information, improving the understanding of plant diseases. This study focuses on integrating explainability metrics into model evaluation, with a detailed analysis of explainability methods applied to plant disease classification models. Using Class Activation Mapping based visualization methods with architectures such as EfficientNet, MobileNet, ResNet, and ShuffleNet, trained on a public plant disease dataset, the study assessed both classification success and model explainability. Localization results were derived from an energy-based perspective, assessing how well saliency maps aligned with bounding boxes of diseased areas. The findings reveal that feature dimensions and positions in the images significantly influence classification outcomes, highlighting the importance of precise annotations during data labeling. This study uncovers potential biases in disease detection and emphasizes the need for explainability metrics in evaluating deep learning models, paving the way for more accurate and efficient plant disease detection techniques.

Keywords: Precision agriculture, Computer vision, Deep learning, Plant disease classification, Explainability.

Öz

Son yıllarda bilgisayarla görme teknolojileri, hassas tarımda kritik bir rol oynamış, robotik ve yapay zekayı kullanarak mahsul üretiminde görevleri otomatikleştirmiştir. Görüntü tabanlı uygulamalar umut vadetse de, modelin yorumlanabilirliği önemli bir zorluk olmaya devam etmektedir. Açıklanabilir yapay zeka, bitki bilimcilerine yorumlanabilir ve güvenilir bilgiler sunarak bitki hastalıklarının anlaşılmasını geliştirmeyi hedeflemektedir. Bu çalışma, açıklanabilirlik metriklerinin model değerlendirmesine entegrasyonuna odaklanmakta ve bitki hastalığı sınıflandırma modellerine uygulanan açıklanabilirlik yöntemlerinin detaylı bir analizini sunmaktadır. EfficientNet, MobileNet, ResNet ve ShuffleNet gibi mimarilerle, açık bir bitki hastalığı veri seti üzerinde eğitilmiş Sınıf Aktivasyon Haritalama tabanlı görselleştirme yöntemleri kullanılarak hem sınıflandırma başarısı hem de modelin açıklanabilirliği değerlendirilmiştir. Lokalizasyon sonuçları, dikkat haritalarının hastalıklı bölgeleri etiketleyen sınırlayıcı kutularla ne kadar uyumlu olduğunu enerji tabanlı bir perspektiften değerlendirerek elde edilmiştir. Bulgular, görüntülerden çıkarılan özelliklerin boyutları ve konumlarının sınıflandırma sonuçlarını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir ve veri etiketleme aşamasında doğru anotasyonların önemini vurgulamaktadır. Bu çalışma, hastalık tespitindeki olası yanlılıkları ortaya çıkarmakta ve derin öğrenme modellerinin değerlendirilmesinde açıklanabilirlik metriklerinin gerekliliğini vurgulayarak, bitki hastalıklarının daha doğru ve verimli bir şekilde tespit edilmesi için derin öğrenme tekniklerinin optimize edilmesine zemin hazırlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Hassas tarım, Bilgisayarlı görme, Derin öğrenme, Bitki hastalığı sınıflandırması, Açıklanabilirlik.

1 Introduction

In the era of Agriculture 4.0, precision agriculture stands out as a pivotal paradigm, holding the potential to bring about a profound transformation in agricultural methodologies. This revolutionary approach is centered around the adoption of advanced monitoring and intervention technologies. The primary objective is not only to support production efficiency but also to address environmental concerns by minimizing negative impacts associated with traditional farming practices [1]. By leveraging cutting-edge tools, precision agriculture aims to usher in a sustainable and technologically advanced era for the agricultural sector.

Utilizing digital images to analyze and understand the environment, computer vision technologies offer precise, location-specific insights into crops and their surrounding ecosystems. These technologies utilize a variety of sensing modalities to capture detailed information about plant health, growth patterns, and environmental conditions. RGB imaging enables visual inspection of crops, identifying visible symptoms of stress, disease, or nutrient deficiencies. Near-infrared, multispectral, and hyperspectral imaging go beyond the visible spectrum to detect subtle physiological and biochemical changes, offering early warnings of plant health issues.

Deep learning (DL) empowers computer vision with advanced pattern recognition capabilities. The notable advantage of DL lies in its ability to automatically extract features from raw data and form higher-level features through the composition of lower-level ones. The highly hierarchical structure and expansive learning capacity of DL models excel in classification and prediction tasks, demonstrating flexibility in addressing

*Corresponding author/Yazışılan Yazar

complex data analysis challenges. Applied to precision agriculture, DL enables data-driven, automated, and informed decision-making processes. DL finds diverse applications in agriculture, significantly extending its impact across various domains. In plant disease detection, DL facilitates automated and precise identification of diseases, enabling timely intervention and effective disease management [2]. For pest detection, DL is employed to accurately identify pests affecting crops, thus improving pest control strategies. DL aids in weed identification, allowing farmers to implement targeted weed control measures and enhance crop yields. Furthermore, DL models are utilized for leaf classification based on specific characteristics, assisting in the identification and classification of plant species [3]. Plant phenology recognition through DL enables precise timing of agricultural activities aligned with plant growth stages, optimizing resource management. DL also supports the segmentation of roots and soil, offering comprehensive analysis of below-ground structures and their impact on plant health. In crop yield estimation, DL analyses multiple factors to provide accurate yield forecasts, assisting farmers in planning and resource allocation. Additionally, DL facilitates the automated counting of fruits, providing valuable data for harvest planning and yield estimation [4]. In the realm of autonomous farming machinery, DL enhances obstacle detection, ensuring efficient and safe operations. Land cover classification through DL contributes to the monitoring and assessment of agricultural ecosystems and land use patterns [5]. DL is also applied to monitor animal welfare in agricultural settings, ensuring the well-being of livestock. For water management, DL enables precise allocation based on crop requirements, thus conserving water and improving irrigation practices. Finally, DL assists in soil management by analyzing soil composition and optimizing fertilization strategies, thereby enhancing soil health and crop productivity.

Among the above, plant diseases, which lead to reduced harvest yields, constitute a serious threat that not only affects the livelihoods of individual farmers but also has broader implications for the economic stability of nations. Plant diseases are physiological disorders that negatively impact growth, development, and overall health, resulting from the interaction between the host, causal agent, and environment [6]. The broad categorization normally seen among plant diseases falls into two classes: namely biotic and abiotic diseases. Biotic diseases come from living organisms, such as fungi, bacteria, and viruses, while abiotic diseases are caused by non-living agents: environmental conditions, chemicals, and mechanical injury. Biotic diseases are far more aggressive and contagious than abiotic diseases, which are not usually that threatening but preventable.

In the accurate and timely detection of diseases and estimation of severity, DL architectures offer promising solutions that minimize economic losses, enhance food safety, and promote environmentally friendly farming [7]. Despite the enhanced speed and accuracy offered by DL-based methods, they often operate as black-boxes. This means their internal decision-making processes are not easily understood by humans, creating uncertainties about how decisions are made and the principles guiding these models. Explainable Artificial Intelligence (XAI) addresses this challenge by focusing on developing methods and techniques to make the decision-making process of DL models more transparent and interpretable [8]. Integrating XAI with DL models for plant disease detection offers following four benefits.

- ✓ Explain to Discover: Questioning for explanations serves as a valuable method to acquire inherent information and understand the underlying task in plant disease detection. XAI is a potent tool for verifying and gaining new insights into the complexities of plant diseases, leading to a more reliable solution,
- ✓ Explain to Justify: The increasing debates over biased or unfair outcomes in plant disease detection highlight the need for explanations to ensure trustworthy decisions. XAI is essential for providing motives or rationalizations for specific decisions, especially in cases of unexpected outcomes,
- ✓ Explain to Control: Explanation is not just for justifying outcomes but also for preventing errors in the plant disease detection process. Understanding more about the behavior of the system provides superior visibility over vulnerabilities and faults,
- ✓ Explain to Improve: Continuous improvement of DL models used in plant disease detection is a key motivation for explaining algorithms. Models that can be explained and understood are more easily improved.

The integration of XAI techniques in plant disease detection has gained significant attention, with researchers exploring various visualization methods to enhance model interpretability. Among these, Class Activation Mapping (CAM)-based approaches have emerged as powerful tools for uncovering the decision-making processes of CNNs. For instance, Toda and Okura conducted an initial comprehensive analysis to understand the learning process of CNNs during the diagnosis of plant diseases, employing various neuron-wise and layer-wise visualization methods [9]. Their findings showed that Grad-CAM is one of the most effective and cost-efficient methods for generating attention maps.

Building on this finding, in this study, a range of CAM-based visualization methods were implemented using EfficientNet, MobileNet, ResNet, and ShuffleNet architectures, all trained with a publicly available plant disease image dataset. The evaluation of the results focused on two key aspects: classification success and explainability. Classification success was measured using standard metrics such as accuracy, precision, recall, and f1-score to ensure the robustness of the models in correctly identifying plant diseases. Explainability was assessed by analyzing the clarity and interpretability of the generated heatmaps, determining how well the highlighted regions corresponded to the actual diseased areas of the plants as labeled in the dataset. To derive localization evaluation results, explainability maps were analyzed and the bounding boxes in the validation set were considered from an energy-based perspective. Instead of focusing only on the peak value, the amount of energy from the saliency map that fell within the bounding box of the target object was assessed. This approach provided deeper insights into how the models make decisions and helped uncover any potential biases present in the detection of plant diseases. By thoroughly examining and discussing these biases, this study contributes to a more comprehensive understanding of the challenges and limitations in plant disease detection using DL models. This, in turn, can facilitate the optimization of DL techniques for enhanced accuracy and efficiency in plant disease detection. Moreover, it underscores the necessity of incorporating explainability metrics when evaluating the success of DL models in future studies.

2 Literature review

Recent research in the literature emphasizes the integration of XAI with DL models for plant disease detection, providing various benefits. These studies are summarized comparatively in Table 1.

Ghosal et al. constructed an explainable DL framework for identifying, classifying, and quantifying plant stress [10]. Nagasubramanian et al. deployed a novel 3D deep convolutional neural network to leverage the spatial and spectral dimensions of 3D hyperspectral images for classification, and then utilized saliency maps to visualize the most sensitive pixel locations [11]. Brahimi et al. introduced a new trainable visualization technique for classifying plant diseases, utilizing a Convolutional Neural Network (CNN) structure with two deep classifiers, namely the Teacher and the Student, where the combined representation of both serves as a proxy for visualizing the most important image regions [12]. This technique demonstrated superior performance compared to existing visualization methods, as evaluated by the area over perturbation curve. Arvind et al. developed a pipeline to interpret and validate predicted outputs using explainability techniques after classifying plant diseases with transfer learning on both original and augmented data [13]. Batchuluun et al. utilized a convolutional neural network coupled with a residual network and incorporated a class activation map to enhance the performance of plant and crop disease classification using thermal images [14].

Wei et al. examined the interpretability of different classification models using the fruit disease leaves dataset through three experiments: the first focused on classifying fruit and pest species, the second addressed fruit disease classification, and the third examined fruit type classification [15]. Shah et al. enhanced in [12] and created an architecture called ResTS (Residual Teacher/Student), featuring two classifiers and a decoder, which serves as both a visualization and classification tool [16].

Table 1. Summary of the literature on explainability for the detection of plant diseases.

Reference	Year	Dataset	Deep Learning Architecture	Best Result (%)		Explainability Approach	Explainability Purpose
				Accuracy	f1-Score		
[10]	2018	Self-collected soybean images	DCNN	94.13	*	Top-K high-resolution feature maps	identify and quantify foliar stresses
[11]	2019	Self-collected charcoal rot stem images	3D DCNN	95.73	87	Saliency map	provide physiological insight into model predictions
[12]	2019	PlantVillage	VGG16	*	*	Teacher/Student	provide an interpretable architecture
[13]	2021	PlantVillage	VGG16, VGG19, ResNet50, Inception, MobileNet, MobileNetV2, EfficientNet	92.49	98.42	Grad-CAM, LIME	eliminate false positives
[14]	2022	Self-collected thermal plant images, Paddy crop	CNN	98.55	80.25	CAM	improve classification performance
[15]	2022	Plant Village, AI Challenger 2018	VGG, GoogLeNet, ResNet	99.89	*	SmoothGrad, LIME, GradCAM	clarify the focus of the model in feature extraction
[16]	2022	PlantVillage	Xception+Unet	*	99.1	ResTS	create top-quality visualizations to identify specific spots
[17]	2023	Self-collected omics data and hyperspectral images	CNN	95.5	95.4	saliency maps, activation maximization	visualize the internal representations of the model
[18]	2023	Apple, Embrapa, Maize, PlantVillage, Rice	VGG+ViT	98.86	98.85	Grad-CAM, LIME	interpret prediction results
[19]	2023	Cassava	VOLO, EfficientNetV2S, RESNEXT50	90.5	*	SHAP	generate user-level explainability
[20]	2023	Sunflower	CNN, VGG19, InceptionV3, Xception, ResNet v2, MobileNet, DenseNet201, MobileNetV2, VGG16	93	93	LIME	understand misclassifications
[21]	2023	Self-collected maize images	DenseNet, EfficientNet, MobileNetV3, ShuffleNetV2	*	96.049	LayerCAM, ScoreCAM, AblationCAM, XGradCAM	improve model interpretability

*: Not applied.

Shoaib et al. introduced a novel explainable gradient-based approach, EG-CNN, which integrates gene expression data with image data to attain a comprehensive comprehension of plant diseases [17]. Thakur et al. developed a hybrid model that combines the strengths of a vision transformer with the feature extraction capability of convolutional neural networks for lightweight disease classification and then evaluated the explainability of its predictions [18]. Chhetri et al. proposed a generic approach that combines semantic technology and DL to enhance prediction accuracy and generate user- friendly explanations [19]. Ghosh et al. developed a hybrid model combining transfer learning and a simple CNN for detecting sunflower diseases, using explainability techniques to analyze misclassifications by generating perturbations in model behavior [20]. Yang et al. introduced a framework for classifying and localizing maize leaf spot diseases using weakly supervised learning, combining lightweight convolutional neural networks with interpretable algorithms to achieve high classification accuracy and fast detection speeds, while also localizing disease spots [21].

These studies collectively enhance the understanding of how models classify diseases, uncover potential biases, and validate predictions, ultimately leading to more accurate and reliable plant disease detection systems. Among these approaches, CAM-based methods have been widely adopted due to their demonstrated superiority in many studies. Building on this, the present study implements a range of CAM-based visualization techniques to evaluate localization performance—specifically, assessing how well the highlighted regions align with the actual diseased areas of the plants as annotated in the dataset.

3 Materials and methods

This study aims to evaluate the decision-making processes of the models by comprehensively applying various explainability methods to DL models used in the classification of plant diseases. Figure 1 encapsulates this entire process, illustrating the flow from the raw dataset through training, model selection, application of explainability methods, and finally, the evaluation of the results. This comprehensive approach aims to enhance the understanding of model decision-making in the context of plant disease classification, ultimately contributing to the development of more transparent and interpretable DL models.

3.1 Dataset

High-quality datasets with accurately labelled images are critical for training models to recognize and classify plant diseases effectively. The diversity of the dataset, encompassing various disease types, environmental conditions, and different plant species, enhances the model's ability to generalize across different scenarios, thereby improving its robustness and applicability in real-world settings. Public datasets play a crucial role in meeting the needs of deep learning models for detecting plant diseases. They provide a valuable resource for researchers and practitioners, enabling the development and benchmarking of models without the necessity for costly and time-consuming data collection processes.

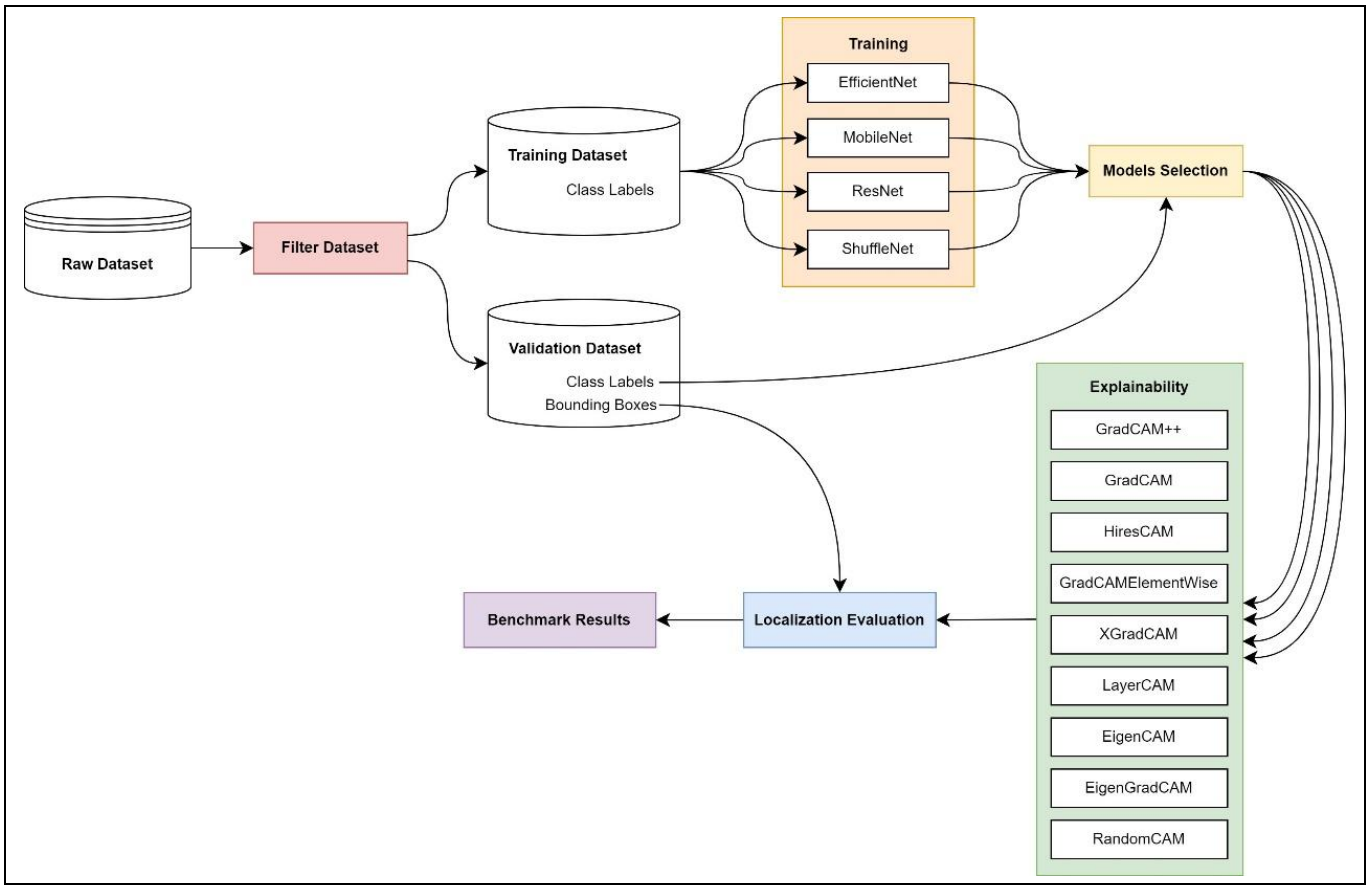


Figure 1. The flowchart of this study.

To generate an explainability score, a ground truth is needed, so a dataset labelled with bounding boxes was used. The FieldPlant [22] dataset was used in this study due to its inclusion of plant disease images sourced directly from fields, accompanied by manual annotations added to individual leaves within each image, overseen by plant pathologists. Field Plant originally includes 8629 individually annotated leaves spanning 27 disease classes. The impact of class imbalance on model training was reduced by filtering out classes with very few representations in the existing dataset. Accordingly, classes with fewer than 50 examples were excluded from the study. Thirteen different classes with 50 or more samples were utilized: cassava brown leaf spot, cassava healthy, cassava mosaic, cassava root rot, corn brown spots, corn healthy, corn streak, corn stripe, corn yellowing, corn leaf blight, tomato brown spots, tomato blight leaf, and tomato leaf yellow virus. Figure 2 presents randomly selected example images for these classes. For each class, three images are shown that depict various health issues and disease symptoms.

The data for the classification process was divided into training and validation sets using a random stratified split to ensure class balance. Specifically, 80% of the data was allocated for training, while the remaining 20% was reserved for validation. The training dataset includes class labels, which are essential for teaching the model to recognize different classes. In contrast, the validation dataset contains both class labels and bounding boxes. This distinction is crucial as it allows for a comprehensive evaluation of the model's performance. While the class labels enable assessment of classification accuracy, the inclusion of bounding boxes facilitates evaluation of the model's localization capabilities. This dual evaluation approach ensures that the model is not only accurate in identifying classes but also proficient in accurately locating the objects within those classes.

3.2 Deep learning models

CNN is a DL architecture designed specifically for processing structured grid data such as images. Their hierarchical structure of convolutional and pooling layers allows them to learn spatial hierarchies in data, making them powerful for a variety of tasks in computer vision. The development of various CNN architectures has enabled more efficient, deeper, and accurate models suitable for diverse applications, from mobile devices to large-scale image classification tasks [23].

There are several types of CNN architecture, each designed to address specific challenges or improve performance. To classify plant diseases, four DL models utilizing CNN architecture were employed: EfficientNet, MobileNet, ResNet, and ShuffleNet. These models were selected for their proven effectiveness, diverse designs, and balanced trade-offs between accuracy and computational efficiency. EfficientNet [24] is designed to achieve superior performance by utilizing a compound scaling method, which carefully balances network depth, width, and resolution, thus improving accuracy while maintaining efficiency in terms of model size and computational cost. MobileNet [25] uses depthwise separable convolutions, a technique that splits the standard convolution operation into two lighter operations, drastically reducing computational complexity while still allowing the model to capture intricate features. ResNet [26] introduced the concept of residual learning, where shortcut connections are added between layers, allowing gradients to flow more easily during backpropagation. This helps address the vanishing gradient problem and facilitates the training of very deep neural networks. ShuffleNet [27] employs pointwise group convolution and channel shuffle operations to reduce computation cost while maintaining accuracy.

All models were trained on the training set using the MMPreTrain [28] framework. The hyperparameter configurations used for the models are as provided in Table 2. This paper does not aim to demonstrate superior classification success but rather to provide a localization evaluation of CAM-based explainability techniques. Consequently, extensive hyperparameter optimization was not conducted for the DL architectures. They were executed with default model training settings, except those specified in the table.

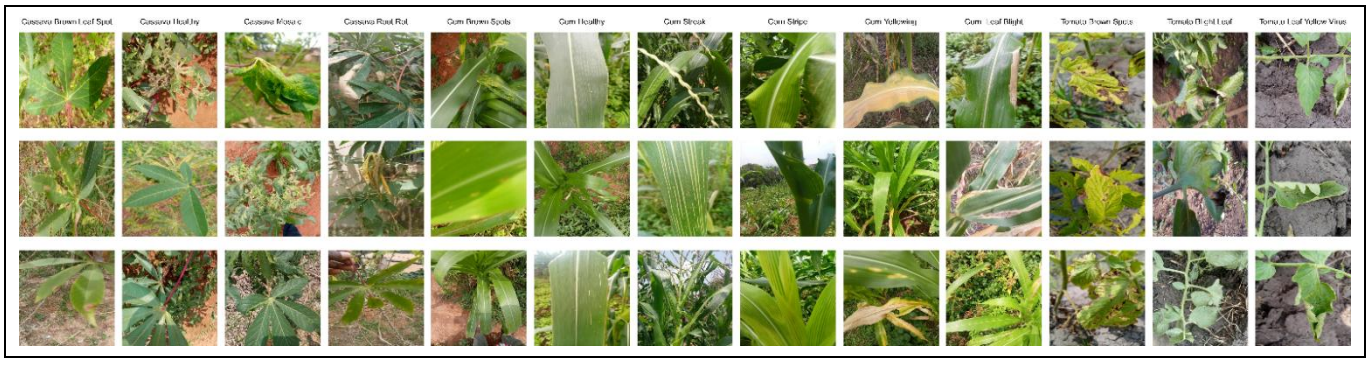


Figure 2. Representative images from the FieldPlant.

Table 2. The hyperparameter configurations.

Model	Backbone	Optimizer	Learning Rate	Augmentation	Batch Size	Epoch Number
EfficientNet	EfficientNet B0	AdamW	0.001	ShiftScaleRotate RandomBrightnessContrast RandomFlip	16	50
MobileNet	MobileNetV2	AdamW				
ResNet	ResNet 101	SGD				
ShuffleNet	ShuffleNetV1	AdamW				

3.3 Explainability

Explainability refers to the ability to interpret and understand the decision-making processes of DL models. Various types of explainability methods exist, including those that assign importance scores to input features indicating their contributions to the model's output, approximate the model locally with a simpler surrogate model, or generate rules that describe the model's behavior. CAM is a technique used in DL, particularly in CNNs, to identify and visualize the regions of an input image that are most relevant for predicting a specific class. CAM helps to understand which parts of the image contribute most to the model's decision, thereby providing interpretability to otherwise black-box models.

In this study, nine distinct CAM-based methods were employed: GradCAM, GradCAM++, HiResCAM, GradCAMElementWise, XGradCAM, LayerCAM, EigenCAM, EigenGradCAM, and RandomCAM. Grad-CAM operates by computing the gradients of the predicted class with respect to the feature maps of the final convolutional layer [29]. The gradients are averaged to obtain weights for each feature map channel, which are used to create a weighted sum of the feature maps. After applying a ReLU to retain positive contributions, the resulting heatmap highlights the image regions most influential in the model's decision.

To formalize this process mathematically, let us consider how Grad-CAM computes its visual explanations. Given an input image, the CNN generates feature maps A^k from a convolutional layer. These feature maps are used to compute the score y^c for the target class c. Firstly, the gradients of the score y^c with respect to the feature maps A^k are computed. These gradients indicate the importance of each feature map for the target class. Eq. (1) represents the gradient of the score for class c with respect to the (i, j)-th element of the k -th feature map. The gradients are then globally averaged over the spatial dimensions to obtain the importance weights α_k^c for each feature map k. Z is the number of pixels in the feature map. The importance weights α_k^c are then used to perform a weighted sum of the forward activation maps A^k. The ReLU function is applied to the result to ensure that only the positive influences on the class score are considered. This produces the final GradCAM heatmap $L^c_{GradCAM}$, which highlights the regions in the input image that are most relevant for predicting class c.

$$\frac{\partial\, y^c}{\partial\, A_{ij}^k} \tag{1}$$

$$\alpha_k^c = \frac{1}{Z}\sum_i\sum_j \frac{\partial\, y^c}{\partial\, A_{ij}^k} \tag{2}$$

$$L^c_{GradCAM} = ReLU\,(\sum_k \alpha_k^c\, A^k) \tag{3}$$

GradCAM++ is an enhanced version of GradCAM that seeks to overcome key limitations of the original method, particularly in accurately localizing features and dealing with multiple instances of the same class within an image [30]. HiResCAM takes a different approach by performing an element-wise multiplication of activations and gradients. GradCAMElementWise also conducts element-wise multiplication of activations with gradients, followed by a ReLU operation before summation. XGradCAM scales the gradients using normalized activations, effectively weighting the gradients by the relative importance of activation patterns. ScoreCAM departs from gradient-based methods by adopting a perturbation-based strategy. It generates importance maps by masking the input image with scaled activation maps and measuring the drop in the output score for the target class [31]. EigenCAM extracts the first principal component of the 2D activations, revealing overall feature importance regardless of class discrimination [32]. EigenGradCAM builds upon the principles of EigenCAM but reintroduces class-specific gradients to infuse the resulting activation maps with discriminative information. RandomCAM generates CAMs with random uniform values within a specified range for spatial activations, providing a baseline for comparison.

When generating explainability maps, the latest convolution block of each model was utilized. This choice is crucial, as the final convolutional layers often capture the most abstract and representative features relevant to classification tasks. According to MMPreTrain model summary, for EfficientNet Layer 6, for MobileNet the final convolution block (conv2), for ResNet Layer 4, and for ShuffleNet the average of convolution and batch normalization layers belonging to Layer 2.3 were employed.

$$Proportion = \frac{\sum L^c_{(i.j)\in bbox}}{\sum L^c_{(i.j)\in bbox} + \sum L^c_{(i.j)\notin bbox}} \tag{4}$$

Bounding boxes serve as crucial components in training object detection algorithms, particularly those designed to ascertain the precise locations of objects within images. In this study, bounding boxes were used as a key element in the evaluation of explainability. Explainability maps were used to derive localization evaluation results based on bounding boxes in the validation set from an energy-based perspective. Instead of solely focusing on the maximum point, the amount of energy from the saliency map that overlaps with the bounding box of the target object [31] was considered shown in Eq. (4).

4 Results

The performance of the deep learning models and the effectiveness of the explainability methods are assessed using both benchmark classification results and localization evaluations. Firstly, the classification performance of each model is examined to ensure a fair basis for comparison. To compare the classification results, precision, recall and f1-score of each model were used. Given that the plant disease detection problem under consideration is a multi-class classification, the macro f1-score, computed by averaging the f1-scores of all classes, was employed for evaluation. As shown in Table 3, ResNet exhibited the highest recall and f1-score among the models, indicating its superior ability to correctly classify positive samples and maintain a balance between precision and recall.

Table 3. Classification results.

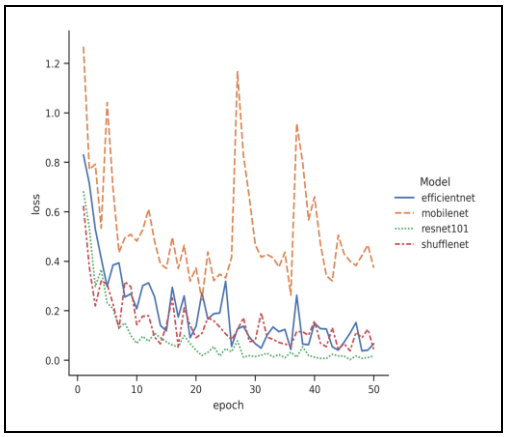
Model	precision	recall	macro f1-score
EfficientNet	90.90	88.36	89.17
Mobilenet	82.48	77.21	78.55
ResNet	89.29	91.32	90.15
ShuffleNet	88.68	88.67	88.20

EfficientNet also performed well, particularly in terms of precision, suggesting its effectiveness in minimizing false

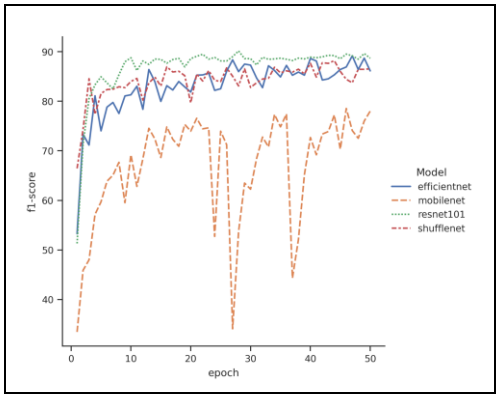
positives. While ShuffleNet produced results close to those of previous models, Mobilenet lagged slightly behind in all metrics.

The training loss and validation f1-scores for the deep learning models over fifty epochs are provided to observe the learning progression of the models and their ability to generalize to new data. In Figure 3(a), the training loss for all models demonstrates a general downward trend, indicating effective learning. However, variations in stability and convergence rates are observed. ResNet exhibits the smoothest decline in loss, with consistent learning over time and a low final loss value. EfficientNet shows a slightly more fluctuating loss curve compared to ResNet, indicating some instability in the training process. ShuffleNet struggles with maintaining consistent learning and optimization. In Figure 3(b) presents the validation f1-scores, highlighting the generalization capabilities of the models. ResNet consistently outperforms the other models. EfficientNet also performs well, with a steady increase in f1-score, closely trailing ResNet. ShuffleNet maintains competitive performance, slightly below EfficientNet. MobileNet has not produced satisfactory results, as evidenced by its high training loss and low validation F1-scores, both of which indicate suboptimal model performance and poor convergence. Despite its weaker performance, MobileNet was deliberately included in the analysis to provide a comparative baseline and to examine how explainability methods behave when applied to a relatively underperforming model.

The localization-based explainability proportions of the models for each class are given in Table 4-7. The mean of the nine different explainability localization evaluations produced by each deep learning architecture for each disease class is given in italics in the tables for the highest value. The highest mean localization proportion produced by any deep learning architecture for each disease class is given in bold in the tables.



(a)



(a)

Figure 3(a): Training loss and (b): Validation f1-scores of models.

Table 4. EfficientNet explainability localization evaluation.

	GradCAM++	GradCAM	HiResCAM	GradCAMElementWise	XGradCAM	LayerCAM	EigenCAM	EigenGradCAM	RandomCAM	Mean
cassava brown leaf spot	0.81	0.79	0.82	0.79	0.64	0.81	0.79	0.86	0.71	*0.78*
cassava healthy	0.69	0.59	0.69	0.65	0.61	0.66	0.64	0.68	0.58	0.64
cassava mosaic	0.73	0.66	0.75	0.69	0.54	0.71	0.68	0.75	0.59	0.68
cassava root rot	0.65	0.49	0.64	0.63	0.45	0.66	0.62	0.74	0.51	0.60
corn brown spots	0.56	0.57	0.60	0.56	0.45	0.58	0.54	0.63	0.48	0.55
corn healthy	0.69	0.69	0.61	0.68	0.70	0.68	0.72	0.65	0.71	0.68
corn streak	0.74	0.72	0.76	0.68	0.58	0.69	0.65	0.74	0.57	0.68
corn stripe	0.74	0.76	0.76	0.72	0.69	0.73	0.71	0.79	0.70	0.73
corn yellowing	0.57	0.60	0.66	0.53	0.33	0.55	0.46	0.63	0.42	0.53
corn leaf blight	0.68	0.63	0.71	0.63	0.53	0.65	0.60	0.72	0.56	0.64
tomato brown spots	0.51	0.47	0.56	0.50	0.26	0.53	0.44	0.65	0.36	0.48
tomato blight leaf	0.58	0.48	0.59	0.55	0.42	0.57	0.52	0.59	0.45	0.53
tomato leaf yellow virus	0.66	0.61	0.79	0.62	0.44	0.66	0.56	0.90	0.43	0.63

Table 5. MobileNet explainability localization evaluation.

	GradCAM++	GradCAM	HiResCAM	GradCAMElementWise	XGradCAM	LayerCAM	EigenCAM	EigenGradCAM	RandomCAM	Mean
cassava brown leaf spot	0.84	0.78	0.82	0.82	0.77	0.84	0.91	0.80	0.74	0.81
cassava healthy	0.74	0.72	0.73	0.72	0.67	0.73	0.74	0.71	0.61	0.71
cassava mosaic	0.71	0.69	0.69	0.71	0.68	0.72	0.79	0.68	0.63	0.70
cassava root rot	0.56	0.51	0.51	0.53	0.60	0.54	0.63	0.45	0.42	0.53
corn brown spots	0.70	0.64	0.64	0.62	0.59	0.64	0.72	0.64	0.56	0.64
corn healthy	0.76	0.72	0.81	0.75	0.73	0.79	0.71	0.73	0.64	0.74
corn streak	0.71	0.77	0.77	0.73	0.71	0.75	0.80	0.80	0.63	0.74
corn stripe	0.92	0.87	0.87	0.84	0.80	0.87	0.94	0.91	0.74	***0.86***
corn yellowing	0.53	0.53	0.49	0.49	0.49	0.51	0.63	0.51	0.46	0.52
corn leaf blight	0.72	0.67	0.68	0.65	0.64	0.67	0.75	0.66	0.58	0.67
tomato brown spots	0.46	0.42	0.49	0.51	0.43	0.50	0.56	0.69	0.40	0.50
tomato blight leaf	0.56	0.51	0.51	0.56	0.51	0.55	0.67	0.66	0.51	0.56
tomato leaf yellow virus	0.52	0.47	0.45	0.54	0.50	0.51	0.79	0.70	0.43	0.54

Table 6. ResNet explainability localization evaluation.

	GradCAM++	GradCAM	HiResCAM	GradCAMElementWise	XGradCAM	LayerCAM	EigenCAM	EigenGradCAM	RandomCAM	Mean
cassava brown leaf spot	0.86	0.85	0.85	0.84	0.80	0.85	0.89	0.89	0.74	**0.84**
cassava healthy	0.74	0.74	0.74	0.73	0.69	0.73	0.72	0.78	0.65	**0.72**
cassava mosaic	0.78	0.77	0.76	0.75	0.68	0.75	0.81	0.84	0.62	**0.75**
cassava root rot	0.64	0.63	0.64	0.63	0.59	0.63	0.68	0.75	0.56	**0.64**
corn brown spots	0.65	0.64	0.64	0.63	0.61	0.64	0.69	0.71	0.54	**0.64**
corn healthy	0.85	0.85	0.85	0.81	0.76	0.83	0.83	0.89	0.68	**0.82**
corn streak	0.77	0.77	0.77	0.75	0.73	0.75	0.82	0.82	0.66	**0.76**
corn stripe	0.87	0.86	0.86	0.84	0.81	0.85	0.91	0.92	0.74	*0.85*
corn yellowing	0.55	0.55	0.55	0.53	0.50	0.54	0.60	0.65	0.44	**0.55**
corn leaf blight	0.72	0.72	0.71	0.69	0.64	0.70	0.78	0.79	0.59	**0.70**
tomato brown spots	0.51	0.51	0.51	0.49	0.43	0.50	0.65	0.65	0.39	**0.52**
tomato blight leaf	0.64	0.64	0.64	0.62	0.56	0.63	0.78	0.77	0.48	**0.64**
tomato leaf yellow virus	0.68	0.67	0.69	0.66	0.53	0.67	0.86	0.86	0.53	**0.68**

Table 7. ShuffleNet explainability localization evaluation.

	GradCAM++	GradCAM	HiResCAM	GradCAMElementWise	XGradCAM	LayerCAM	EigenCAM	EigenGradCAM	RandomCAM	Mean
cassava brown leaf spot	0.66	0.76	0.72	0.76	0.76	0.74	0.81	0.78	0.73	*0.75*
cassava healthy	0.56	0.67	0.63	0.63	0.61	0.59	0.75	0.68	0.64	0.64

Table 7. Continued.

	GradCAM++	GradCAM	HiResCAM	GradCAMElementWise	XGradCAM	LayerCAM	EigenCAM	EigenGradCAM	RandomCAM	Mean
cassava mosaic	0.57	0.62	0.64	0.65	0.65	0.65	0.71	0.72	0.63	0.65
cassava root rot	0.46	0.55	0.51	0.52	0.49	0.51	0.49	0.49	0.42	0.49
corn brown spots	0.49	0.50	0.52	0.54	0.52	0.57	0.44	0.55	0.49	0.51
corn healthy	0.61	0.57	0.57	0.61	0.60	0.56	0.67	0.74	0.66	0.62
corn streak	0.62	0.70	0.65	0.65	0.58	0.73	0.53	0.70	0.61	0.64
corn stripe	0.67	0.71	0.65	0.69	0.70	0.70	0.72	0.72	0.70	0.70
corn yellowing	0.34	0.32	0.37	0.45	0.41	0.41	0.50	0.57	0.44	0.42
corn leaf blight	0.54	0.54	0.56	0.59	0.56	0.60	0.54	0.57	0.57	0.56
tomato brown spots	0.35	0.43	0.44	0.56	0.41	0.63	0.48	0.76	0.38	0.49
tomato blight leaf	0.42	0.48	0.52	0.53	0.42	0.58	0.39	0.55	0.40	0.48
tomato leaf yellow virus	0.42	0.57	0.70	0.66	0.50	0.76	0.40	0.75	0.42	0.57

EfficientNet demonstrates the highest mean localization proportion for cassava brown leaf spot at 0.78, while tomato brown spots exhibit the lowest proportion at 0.48. For MobileNet, the class with the highest average localization proportion is corn stripe with 0.86, whereas the lowest proportion is observed for tomato brown spots with 0.50. ResNet shows the highest average localization proportion of 0.85 for corn stripe, while tomato brown spots have the lowest proportion at 0.52. ShuffleNet achieves the highest average localization proportion of 0.75 for cassava brown leaf spot, while corn yellowing exhibits the lowest proportion of 0.42. ResNet has the highest average localization proportions across all explainability techniques for all classes except corn stripe, with MobileNet leading in this specific class. This indicates that ResNet consistently outperforms other models in terms of the quality of explanations generated by various CAM-based techniques. EfficientNet also tends to produce consistent and high localization accuracy across most disease classes. Finally, ShuffleNet exhibits the lowest localization performance overall, facing particular challenges in certain disease classes. This suggests that it may require further optimization to improve.

Additionally, evaluating explainability alongside classification performance shows that high accuracy does not necessarily imply high explainability. For instance, although EfficientNet demonstrates strong classification capabilities, its localization proportions are relatively low. Conversely, MobileNet, which exhibits the lowest classification performance among the models, does not produce the lowest localization proportions.

The localization proportions produced by each explainability technique vary depending on the model and class. EigenCAM and EigenGradCAM consistently yield high values, with the highest localization proportion achieved by MobileNet on the corn stripe class, reaching 94% using EigenCAM. On the other hand, XGradCAM and RandomCAM produce lower values. The lowest localization proportion was observed with EfficientNet on the tomato brown spots class, achieving only 26% with XGradCAM. This variation suggests that some techniques are more effective at accurately highlighting relevant regions within images, regardless of the model or class. These results demonstrate the potential of these techniques as valuable tools for enhancing the interpretability of deep learning models in various classification tasks.

Explainability maps of randomly selected images from classes with the highest and lowest localization evaluation proportions for each model are shown in Figure 4 and Figure 5.

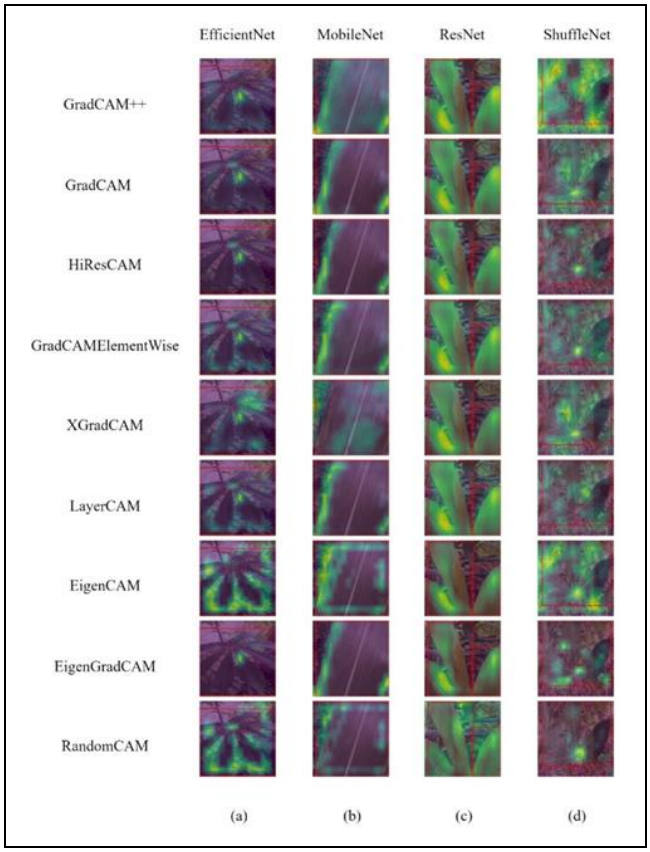


Figure 4. Explainability maps for the classes where the models show the highest localization evaluation proportion.

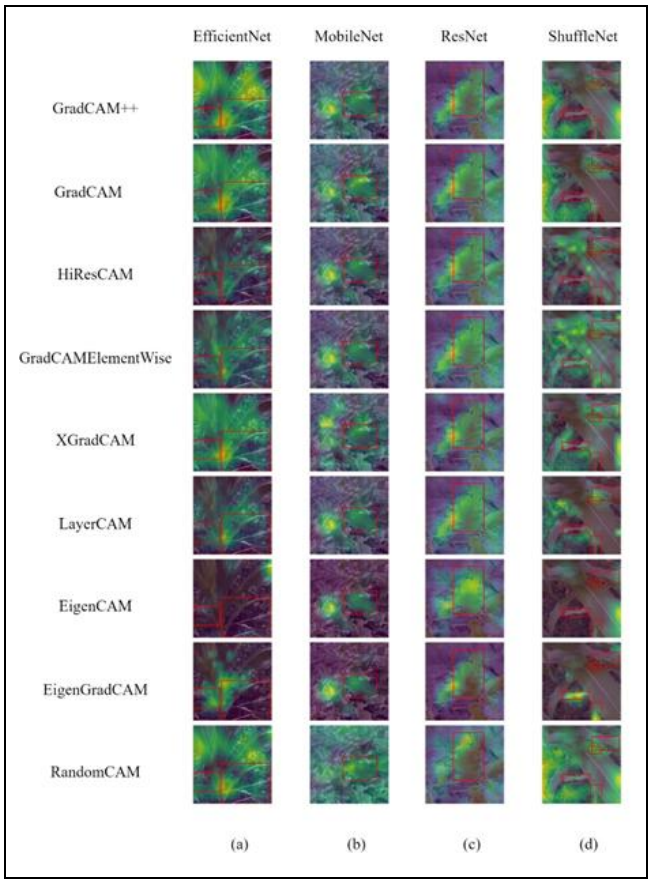


Figure 5. Explainability maps for the classes where the models showed the lowest success localization evaluation proportion.

These figures highlight the regions of interest identified by each model during predictions. The following outcomes emerged from evaluating these images based on their localization proportions.

- ✓ Deep learning models capture the colors and textures of lesions associated with particular diseases during classification, mirroring human decision-making processes.
- ✓ The larger area of the bounding box results in features extracted for classification originating from a broader visual area (Figure 4(a), Figure 4(b), Figure 4(d)). Consequently, this leads to a high proportion for the respective class. For example, when most of the image comprises plants belonging to the specific anomaly, it contributes to the higher proportion.
- ✓ As seen in Figure 4(c), the high proportion is also related to the robustness of the model. Extracting features from the correct area in classification ensures a high proportion. When the model accurately focuses on the diseased parts of the plant, it demonstrates its reliability and robustness in disease detection, which is crucial for practical applications in agriculture.
- ✓ When features are extracted from inappropriate regions in classification, possibly due to bias, it results in a lower proportion (Figure 5(b)). For instance, the model may focus on the background or other plants rather than the anomaly present in the target plant. This misdirection results in inaccurate classifications and diminished model performance.
- ✓ Models may generate poor explainability proportion due to the presence of characteristic features of the relevant class scattered across multiple areas in the image (indicated by multiple bounding boxes, Figure 5(a)). In such instances, while features extracted from a smaller area might be adequate for classification, the abundance of ground truth areas could lead to a decrease in the proportion. For instance, if anomalies are present in three different leaves of a plant, the model might classify them using only the features extracted from a single leaf. This highlights the challenge of ensuring that all relevant features are considered for accurate classification.
- ✓ The explainability proportion is adversely impacted when essential features required for classification are localized within a small area (indicated by multiple small bounding boxes, Figure 5(d)). In such scenarios, the model encounters difficulties in decision-making, as it grapples with identifying the relevant regions, thus compromising its robustness. For instance, this occurs when an anomaly in a plant is confined to a tiny portion of a leaf. The struggle of model to focus on such small, yet critical areas, results in lower proportions.
- ✓ Finally, as observed in the example shown in Figure 5(c), even if the necessary features for the classifier are extracted from the correct area, the proportion may still be low if the ground truth area is a subset of this larger area. For example, extracting features from the entire leaf for an anomaly located in a smaller area of the leaf. This issue underscores the importance of precise localization in feature extraction to ensure high explainability proportions and accurate disease detection.

Overall, the size of the bounding box significantly influences the explainability proportion-larger bounding boxes typically yield higher proportions because they encompass more relevant visual features, especially when the majority of the image depicts the anomaly. High localization proportions also indicate model robustness, as seen when the model focuses accurately on the diseased areas, reinforcing its reliability in real-world agricultural scenarios. Conversely, when the model extracts features from irrelevant regions-due to bias or misdirection-the proportion drops, leading to misclassifications. In some cases, scattered anomaly features across the image lower explainability even if the classification is correct, because the model may only use a subset of the relevant information. Similarly, when anomalies are confined to very small regions, the model struggles to correctly identify and extract features, negatively impacting both the proportion and robustness. Lastly, even when correct areas are targeted, if the model uses a larger-than-necessary region, explainability suffers, emphasizing the need for precise localization.

Although the explanations provide valuable insights, it is important to note that their reliability is inherently tied to the performance of the underlying model. Inaccurate or low-performing models may generate explanations that suggest correlations or reasoning patterns that do not align with the actual data. In such cases, it is essential to ensure that the model is neither overfitting nor underfitting. An overfitted model may perform well on training data but fail to generalize, leading to explanations valid only in a narrow context. Conversely, an underfitted model may miss key patterns, resulting in overly simplistic or inaccurate explanations.

5 Conclusions

By leveraging vast amounts of data, DL models can accurately identify and classify a wide range of plant diseases, often surpassing traditional methods in speed and accuracy. However, evaluating the effectiveness of these models reveals that relying solely on classification performance is insufficient. This limitation arises from the varied data used for model training, which is collected from different devices like smartphones and cameras under inconsistent environmental conditions. The lack of standardization in real-world scenarios leads to disparities in lighting, zoom levels, resolutions, and other factors, introducing biases into the dataset. Consequently, models trained on such biased datasets inherently reflect these biases, ultimately limiting their ability to generalize well to unseen data.

In this paper, the evaluation was expanded beyond conventional classification metrics. In addition to assessing the models based on their classification performance, CAM-based explainability scores were also employed. This process involves comparing the explainability maps against the ground truth provided by the bounding boxes in the validation dataset to assess how accurately the models can localize the areas of interest related to plant diseases. By analyzing the localization proportions, it becomes possible to not only assess the accuracy and reliability of the models' predictions but also to uncover flaws or limitations within the dataset itself. This dual evaluation process provides a comprehensive understanding of the model performance and highlights areas where the dataset may need improvement. Potential improvements may encompass enriching data collection methodologies through the inclusion of more diverse samples, ensuring uniformity in imaging and labeling conditions for consistency, and implementing cutting-edge preprocessing techniques to further elevate dataset quality.

This paper highlights the critical importance of incorporating explainability metrics into the evaluation framework for DL models. Doing so offers transparent insight into the decision-making mechanisms of the model, thereby enhancing trust and understanding among stakeholders regarding the results. This transparency enables farmers and agronomists to make informed adjustments based on their knowledge and local conditions. Moreover, decisions based on model predictions can have far-reaching consequences. From optimizing crop yields to minimizing pesticide usage and conserving water resources, the impact of these decisions extends beyond individual farms to broader environmental and socio-economic landscapes. Therefore, ensuring the transparency and interpretability of deep learning models becomes imperative for fostering responsible and sustainable agricultural practices.

The proposed approach not only streamlines the identification of potential biases and errors in the detection process but also fosters a deeper investigation into how these issues affect model performance.

6 Ethics committee approval and conflict of interest statement

“There is no need for permission from the ethics committee for the article prepared”. “There is no conflict of interest with any person or institution in the article prepared”.

7 Author contribution statements

Duygu Sinanç Terzi contributed to the idea formation, design, literature review, result evaluation, and content writing of the article.

8 References

[1] Da Silveira F, Lerme, FH, Amaral FG. “An overview of agriculture 4.0 development: systematic review of descriptions, technologies, barriers, advantages, and disadvantages”. *Computers and Electronics in Agriculture*, 189, 106405, 2021.

[2] Albahar M. “A survey on deep learning and its impact on agriculture: challenges and opportunities”. *Agriculture*, 13(3), 540, 2023.

[3] Saranya T, Deisy C, Sridevi S, Anbananthen KSM. “A comparative study of deep learning and internet of things for precision agriculture”. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 122, 106034, 2023.

[4] Farjon G, Liu H, Yael E. "Deep-learning-based counting methods, datasets, and applications in agriculture: A review." *Precision Agriculture*, 24, 1683-1711, 2023.

[5] Chakraborty SK, Chandel NS, Jat D, Tiwari MK, Rajwade YA, Subeesh, A. "Deep learning approaches and interventions for futuristic engineering in agriculture." *Neural Computing and Applications,* 34, 20539-20573, 2022.

[6] Ahmad A, Saraswat D, El Gamal A. “A survey on using deep learning techniques for plant disease diagnosis and recommendations for development of appropriate tools”. *Smart Agricultural Technology*, 3, 100083, 2023.

[7] Abade A, Ferreira PA, de Barros Vidal F. “Plant diseases recognition on images using convolutional neural networks: a systematic review”. *Computers and Electronics in Agriculture*, 185, 106125, 2021.

[8] Ding W, Abdel-Basset M, Hawash H, Ali AM. “Explainability of artificial intelligence methods, applications and challenges: A comprehensive survey”. *Information Sciences*. 615, 238-292, 2022.

[9] Toda Y, Okura F. “How convolutional neural networks diagnose plant disease”. *Plant Phenomics*, 19, 9237136, 2019.

[10] Ghosal S, Blystone D, Singh AK, Ganapathysubramanian B, Singh A, Sarkar S. “An explainable deep machine vision framework for plant stress phenotyping”. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(18), 4613-4618, 2018.

[11] Nagasubramanian K, Jones S, Singh AK, Sarkar S, Singh A, Ganapathysubramanian B. “Plant disease identification using explainable 3D deep learning on hyperspectral images”. *Plant Methods*, 15, 1-10, 2019.

[12] Brahimi M, Mahmoudi S, Boukhalfa K, Moussaoui A. “Deep interpretable architecture for plant diseases classification”. *2019 IEEE Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications*, Poznan, Poland, 18-20 September 2019.

[13] Arvind C, Totla A, Jain T, Sinha N, Jyothi R, Aditya K, Farhan M, Sumukh G, Ak G. “Deep Learning Based Plant Disease Classification with Explainable AI and Mitigation Recommendation”. *2021 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence*, 1-8, Orlando, USA, 05-07 December 2021.

[14] Batchuluun G, Nam SH, Park KR. "Deep learning-based plant classification and crop disease classification by thermal camera". *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 34(10), 10474-10486, 2022.

[15] Wei K, Chen B, Zhang J, Fan S, Wu K, Liu G, Chen D. "Explainable deep learning study for leaf disease classification". *Agronomy*, 12(5), 1035, 2022.

[16] Shah D, Trivedi V, Sheth V, Shah A, Chauhan U. "ResTS: Residual deep interpretable architecture for plant disease detection". *Information Processing in Agriculture*, 9(2), 212-223, 2022.

[17] Shoaib M, Shah B, Sayed N, Ali F, Ullah R, Hussain I. "Deep learning for plant bioinformatics: an explainable gradient-based approach for disease detection". *Frontiers in Plant Science*, 14, 1-17, 2023.

[18] Thakur P S, Chaturvedi S, Khanna P, Sheorey T, Ojha A. "Vision transformer meets convolutional neural network for plant disease classification". *Ecological Informatics*, 77, 102245, 2023.

[19] Chhetri TR, Hohenegger A, Fensel A, Kasali MA, Adekunle AA. "Towards improving prediction accuracy and user-level explainability using deep learning and knowledge graphs: A study on cassava disease". *Expert Systems with Applications*, 233, 120955, 2023.

[20] Ghosh P, Mondal AK, Chatterjee S, Masud M, Meshref H, Bairagi AK. "Recognition of sunflower diseases using hybrid deep learning and its explainability with AI". *Mathematics*, 11(10), 2241, 2023.

[21] Yang S, Xing Z, Wang H, Gao X, Dong X, Yao Y, Zhang R, Zhang X, Li S, Zhao Y, Liu Z. "Classification and localization of maize leaf spot disease based on weakly supervised learning". *Frontiers in Plant Science*, 14, 1128399, 2023.

[22] Moupojou E, Tagne A, Retraint F, Tadonkemwa A, Wilfried D, Tapamo H, Nkenlifack M. "FieldPlant: A dataset of field plant images for plant disease detection and classification with deep learning". *IEEE Access*, 11, 35398-35410, 2023.

[23] Karahan T, Nabiyev V. "Plant identification with convolutional neural networks and transfer learning". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(5), 638-645, 2021

[24] Tan M, Quoc L. "Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks". *2019 International Conference on Machine Learning,* Long Beach, California, 9-15 June 2019.

[25] Sandler M, Howard A, Zhu M, Zhmoginov A, Chen C. "MobileNetV2: Inverted residuals and linear bottlenecks". *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Salt Lake City, USA, 18-23 June 2018.

[26] He K, Zhang X, Ren S, Sun J. "Deep residual learning for image recognition," *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, USA, 27-30 June 2016.

[27] Zhang X, Zhou X, Lin M, J. Sun, "ShuffleNet: An extremely efficient convolutional neural network for mobile devices". *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Salt Lake City, USA, 18-23 June 2018.

[28] OpenMMLab. "MMPreTrain". https://github.com/open-mmlab/mmpretrain (08.10.2024).

[29] Selvaraju RR, Cogswell M, Das A, Vedantam R, Parikh D, Batra D. "Grad-CAM: visual explanations from deep networks via gradient-based localization". *International Journal of Computer Vision*, 128, 336-359, 2020.

[30] Chattopadhay A, Sarkar A, Howlader P, Balasubramanian VN. "Grad-cam++: Generalized gradient-based visual explanations for deep convolutional networks". *2018 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, Lake Tahoe, USA, 12-15 March 2018.

[31] Wang H, Wang Z, Du M, Yang F, Zhang Z, Ding S, Mardziel, P, Hu X. "Score-CAM: Score-Weighted visual explanations for convolutional neural networks". *2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, 24-25, Seattle, USA, 14-19 June 2020.

[32] Muhammad MB, Yeasin M. "Eigen-cam: Class activation map using principal components". *2020 IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, Glasgow, UK, 19-24 July 2020.

Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 31(7), 1299-1306, 2025

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

FPGA prototipleme: RISC-V tabanlı SoC için çip üstü hata ayıklama modülü ve Raspberry Pi ile OpenOCD JTAG üzerinden test süreçleri

FPGA prototyping: On-chip debug module for RISC-V based SoC and testing processes using Raspberry Pi with OpenOCD over JTAG

Sezen Bal[1*], *Hayriye Korkmaz*[2], *Doğukan Biçer*[3], *Celal Alperen Bayar*[2], *Eren Kale*[2], *Eray Kayailli*[2], *Armağan Bi*[2]

[1]Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
sezen.bal@marmara.edu.tr

[2]Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
hkorkmaz@marmara.edu.tr, alperenbayar22@marun.edu.tr, erenkale@marun.edu.tr, eraykayailli88@gmail.com, armaganbi1233@gmail.com

[3]Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
dogukanbicer52@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 06.12.2024 Düzeltme Tarihi/Revision: 21.03.2025 doi: 10.5505/pajes.2025.95694
Kabul Tarihi/Accepted: 02.05.2025 Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışma, RISC-V tabanlı bir System-on-Chip (SoC) tasarımının FPGA üzerinde prototipleme sürecini ve bu süreçte entegre edilen çip üstü hata ayıklama modülünü ele almaktadır. FPGA prototipleme, sayısal tasarımların donanım seviyesinde değerlendirilmesi amacıyla FPGA üzerinde uygulanması ve test edilmesi sürecidir. Çalışmada, Raspberry Pi ve OpenOCD kullanılarak JTAG aracılığıyla gerçekleştirilen hata ayıklama işlemleri, SoC'nin çeşitli fonksiyonlarını ve performansını etkin bir şekilde test etmek için kritik bir adım olarak vurgulanmaktadır. Bu yaklaşım, geliştirme sürecinde maliyetleri düşürmeye ve pazara sunma süresini kısaltmaya katkıda bulunurken, tasarımın son silikon versiyonuna geçişte karşılaşılacak riskleri azaltmaktadır. SoC tasarımı, FPGA üzerinde çalıştırılarak fonksiyonel doğrulama kapsamında çeşitli testlere tabi tutulmuş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Fonksiyonel doğrulama, bir sayısal tasarımın beklenen davranışları sergileyip sergilemediğini kontrol etmek için uygulanan kritik bir test aşamasıdır. Kayan nokta birimi testi kapsamında sinüs fonksiyonu uygulanarak sinüs değerleri hesaplanmış ve birimin doğru çalıştığı doğrulanmıştır. I2C çevre birimi testinde, bir sensör bağlanarak sensörden elde edilen verilerin doğru şekilde alındığı ve işlendiği tespit edilmiştir. Bit manipulation testi, RISC-V bit manipülasyon komutlarının doğru çalıştığını göstermiştir. FreeRTOS uygulamasında, görev zamanlaması, kesmeler ve kaynak yönetimi başarıyla gerçekleştirilmiş ve sistemin çoklu görev yürütme sırasında hatasız çalıştığı doğrulanmıştır. Atomik işlemler ile CSR (Control and Status Registers) birimlerinin doğru işleyişi değerlendirilmiş ve beklendiği gibi çalıştığı doğrulanmıştır. *Bunun yanı sıra, işlemcinin performansı CoreMark ve Dhrystone kıyaslamaları kullanılarak değerlendirilmiştir. CoreMark testinde işlemci, 41.97 iterasyon/saniye (600 iterasyon) skoruna ulaşmış ve CoreMark/MHz değeri 2.51 olarak hesaplanmıştır. Dhrystone kıyaslamasında ise işlemci, 70,582 Dhrystone/saniye performans sergilemiştir. Her bir bileşenin implementasyonu ve ilgili test tezgâhları Verilog HDL ile yazılmış olup, tasarım Terasic De10-Lite FPGA üzerinde uygulanmıştır.*

Anahtar kelimeler: RISC-V işlemci, FPGA, Hata ayıklama, Çip üstü sistem.

Abstract

This paper presents the FPGA prototyping process of a RISC-V based System-on-Chip (SoC) design and the on-chip debug module integrated in this process. FPGA prototyping is the process of implementing and testing digital designs on an FPGA for hardware-level evaluation. In the study, debugging operations performed via JTAG using Raspberry Pi and OpenOCD are highlighted as a critical step to effectively test the various functions and performance of the SoC. This approach contributes to reducing costs in the development process and shortening time-to-market, while reducing the risks involved in the transition to the final silicon version of the design. The SoC design was executed on FPGA and subjected to various tests within the scope of functional verification and successful results were obtained. Functional verification is a critical testing phase to check whether a digital design exhibits the expected behavior. Within the scope of the floating-point unit test, sine values were calculated by applying the sine function and the correct operation of the unit was verified. In the I2C peripheral test, a sensor was connected, and it was determined that the data obtained from the sensor was received and processed correctly. The bit manipulation test showed that the RISC-V bit manipulation instructions worked correctly. In the FreeRTOS implementation, task scheduling, interrupts, and resource management were successfully implemented, and the system was verified to be error-free during multitasking. The correct operation of atomic operations and CSR (Control and Status Registers) was evaluated and verified to work as expected. In addition, the performance of the processor was evaluated using CoreMark and Dhrystone benchmarks. In the CoreMark test, the processor achieved a score of 41.97 iterations/second (600 iterations) and the CoreMark/MHz value was calculated as 2.51. In the Dhrystone benchmark, the processor performed 70.582 Dhrystones/second. The implementation of each component and the corresponding testbenches were written in Verilog HDL and the design was implemented on a Terasic De10-Lite FPGA.

Keywords: RISC-V processor, FPGA, Debug, System on chip.

1 Giriş

Gömülü sistem tasarım sürecinde hataların erken aşamalarda tespit edilmesi, geliştirme sürecini kısaltarak ürünün piyasaya sürülme süresini önemli ölçüde azaltmaktadır. Geleneksel hata ayıklama yöntemlerinden biri, tasarımın simülasyon aracılığıyla doğrulandığı ön-silikon doğrulama sürecidir. Bu süreçte giriş-çıkış portlarına ve hatta iç sinyallere dahi erişim sağlanabildiğinden, hatalar kolaylıkla belirlenip düzeltilebilmektedir. Ancak simülasyonlar, her zaman gerçek donanım koşullarını yeterince yansıtmayabilmektedir. Özellikle karmaşık sistemlerde simülasyona dayalı

*Yazışılan yazar/Corresponding author

doğrulamanın yetersiz kalabileceği durumlarda, ön-silikon doğrulama sürecinin bir parçası olarak FPGA prototipleme kullanılmaktadır [1]. FPGA prototipleme, ASIC (Application-Specific Integrated Circuit), ASSP (Application-Specific Standard Product) ve SoC (System on Chip) gibi özelleştirilmiş çip tasarımlarının geliştirilmesinde kritik bir role sahiptir. Bu yöntem, tasarımların fiziksel bir silikon çip üretilmesinden önce FPGA üzerinde uygulanarak doğrulanmasına ve test edilmesine olanak sağlamaktadır [2]. Bu doğrultuda, çip üstü hata ayıklama modülleri FPGA prototipleme sırasında işlemcinin iç durumunu izleme ve kontrol etme imkânı sunmaktadır [3].

RISC-V, açık kaynaklı bir işlemci mimarisi olarak, donanım tasarımında modülerlik ve özelleştirme imkanları sunarak teknoloji dünyasında önemli bir yer edinmiştir. Bu mimari, Berkeley'deki California Üniversitesi'nde başlatılan bir proje olup, işlemci tasarımı ve geliştirilmesi süreçlerini daha erişilebilir hale getirmeyi amaçlamaktadır [4]. RISC-V'nin temel avantajlarından biri, lisans ücreti gerektirmemesi ve kaynak kodlarının herkese açık olmasıdır. Bu özellikler, akademik ve ticari kullanımlar için ideal bir platform sağlamaktadır [5].

RISC-V Instruction Set Architecture (ISA), bu mimari tarafından tanımlanan komut setidir [6]. ISA, yazılımın donanım üzerinde nasıl çalıştırılacağını belirleyen temel komutlar ve protokoller bütünüdür. RISC-V ISA, temel tamsayı işlemleri (RV32I, RV64I gibi) sağlamanın yanı sıra, çeşitli işlem türleri için ek genişletmeler sunmaktadır. Bu genişletmeler arasında matematik işlemler, güvenlik işlevleri, sanallaştırma desteği ve çok daha fazlası bulunmaktadır. Özellikle bu çalışmada odaklanılan RISC-V 32 (RV32IMAFBC_Zicsr_Zifencei) konfigürasyonu, geniş bir işlevsellik yelpazesi sunmaktadır. Bu konfigürasyon; tamsayı matematik işlemleri (I), çarpma ve bölme (M), tek ve çift duyarlıklı kayan nokta işlemleri (F), bit maipüşasyon işlemleri (B), atomik işlemler (A), sıkıştırılmış komutlar (C), işlemci durum kayıtlarını yönetme (Zicsr) ve sıralama engelleri (Zifencei) gibi özellikleri içermektedir.

Bu geniş yetenek seti, RISC-V ISA'nın çeşitli teknoloji alanlarında yenilikçi çözümler sunmasını sağlamaktadır [7]. Özellikle yüksek performanslı bilgi işlem (HPC) için, Wang ve diğ. tarafından önerilen Extended Base Global Address Space (xBGAS) genişlemesi gibi özel genişletmeler, düğümler arası bağlantılarla ilgili yazılım maliyetlerini azaltmayı amaçlamaktadır [8]. Sanallaştırma teknolojisinde, Chen ve diğ. tarafından geliştirilen DuVisor, kullanıcı seviyesinde sanallaştırma işlemlerini çekirdeğe sıkışmadan yönetebilmenin yollarını araştırmaktadır [9]. Elsabbagh ve arkadaşları tarafından geliştirilen Vortex genel amaçlı GPU'su, RISC-V tabanlı SIMT (Single Instruction, Multiple Threads) yürütme modelini destekleyecek yeni komutlar sunarak, RISC-V'nin grafik hesaplama yeteneklerini artırarak multimedya uygulamaları için daha etkili çözümler sağlamaktadır [10].

RISC-V, açık hata ayıklama standardı olan RISC-V Debug Specification ile donatılmıştır [11]. Bu spesifikasyon, işlemcilerin hata ayıklama arayüzlerini ve işlevlerini tanımlayarak hata ayıklama süreçlerinin standartlaştırılmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca, geliştiricilere sistemin iç durumlarını izleme, hata ayıklama komutlarını iletebilme ve işlemci üzerinde kontrol sağlama gibi imkanlar sunmaktadır [12].

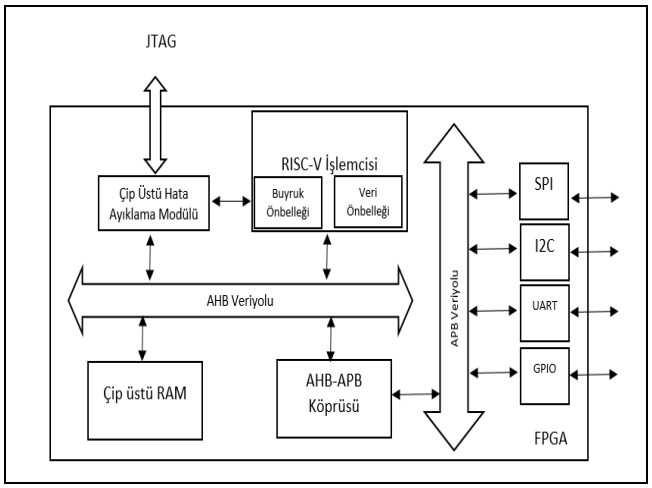
Bu çalışmada incelenen RISC-V tabanlı SoC'ye entegre edilen çip üstü hata ayıklama modülü, işlemcinin iç sinyallerini ve durumlarını dış bir cihazdan izlemeyi mümkün kılmaktadır. Donanım ve yazılım arasında bağlantı kurarak hata ayıklama verilerine erişim sağlamak için JTAG standardı kullanılmaktadır [13]. IEEE 1149.1 standardına dayalı bu arayüz, elektronik sistemlerin güvenilirliğini ve işlevini sağlamak için gerekli olan cihaz programlama, teşhis ve baskılı devre kartlarının test edilmesine olanak tanımaktadır [14].

Bu entegrasyon, işletim sistemi desteği gerektirmeyen bare-metal sistemlerde hata ayıklama işlemlerini daha verimli hale getirmektedir [15]. Bare-metal sistemler, bir bilgisayar veya gömülü sistemde işletim sistemi katmanı olmaksızın, donanım üzerinde doğrudan çalışan yazılımları ifade etmektedir. Çoğu zaman, gerçek zamanlı performans gereksinimleri nedeniyle işlemcinin çalışmasının durdurulması mümkün olmadığı için, işlemcinin iç durumunun gerçek zamanlı olarak izlenmesi büyük önem taşımaktadır. Gerçekleştirilen gerçek zamanlı izleme yöntemi, işlemcinin belirli sinyallerini ve işlem akışını kesintisiz olarak gözlemlemeyi sağlamaktadır. OpenOCD (Open On-Chip Debugger), gömülü hedef cihazlar için hata ayıklama, sistem içi programlama ve sınır tarama (boundary scan) testi sağlayan açık kaynaklı bir araçtır [16]. Bir ana bilgisayar ile hedef cihazdaki JTAG arayüzü arasında bir köprü görevi görmektedir ve geliştiricilerin ürün yazılımlarını doğrudan geliştirdikleri donanım üzerinde dağıtmalarına ve hata ayıklamalarına olanak tanımaktadır. OpenOCD çok çeşitli geliştirme kartlarını ve hata ayıklama protokollerini desteklemektedir, bu da onu çok çeşitli donanım geliştirme görevleri için çok yönlü bir araç haline getirmektedir. Raspberry Pi bu çalışmada hata ayıklama ana bilgisayarı olarak işlev görerek OpenOCD aracılığıyla JTAG üzerinden SoC ile iletişim kurmaktadır. Shan Gao ve arkadaşları tarafından sunulan çalışmada, RISC-V işlemcisi üzerine kurulu bir hızlı yerinde hata ayıklama tasarımı geliştirilmiştir; bu tasarım JTAG arayüzü kullanılarak yapılmıştır [17]. Onur Toker tarafından sunulan çalışmada ise, Vivado yüksek seviye sentez (HLS) aracı kullanılarak RISC-V RV32I tabanlı bir sistem-üzeri-çip (SoC) tasarım yaklaşımı geliştirilmiştir ve düşük maliyetli bir FPGA kartı üzerinde test edilmiştir [18].

Bu çalışma, özellikle karmaşık sistemlerde geleneksel simülasyona dayalı doğrulama yöntemlerinin yetersiz kaldığı durumları ele almaktadır. Gelişmiş SoC tasarımlarında hata ayıklama ve doğrulama süreçlerinde yeterince etkili olamayan bu yöntemlerin yerine, ön-silikon doğrulama sürecinin bir parçası olarak FPGA prototipleme önerilmektedir. Bu çözüm, gerçek donanım koşullarında kapsamlı testler sağlayarak daha etkin bir doğrulama ve hata ayıklama imkânı sunmaktadır. RISC-V tabanlı SoC'nin çeşitli fonksiyonlarının ve performansının Raspberry Pi ve OpenOCD aracılığıyla JTAG üzerinden gerçekleştirilen hata ayıklama işlemleri sayesinde etkin bir şekilde test edilmesine olanak tanımaktadır. Çalışmanın geri kalan bölümü, FPGA tabanlı prototipleme ve hata ayıklama süreçlerinin detaylarını ve sonuçlarını sunmaktadır. İkinci bölüm, SoC'nin ana bileşenlerini tanıtırken, üçüncü bölüm hata ayıklama süreçlerini detaylandırmaktadır. Dördüncü bölümde, bu süreçler çerçevesinde yapılan testler ve sonuçlar tartışılmakta, beşinci ve son bölümde ise elde edilen bulgular değerlendirilerek gelecekteki uygulamalar için öneriler sunulmaktadır.

2 SoC bileşenleri

Şekil 1'deki blok diyagram, FPGA üzerinde bir RISC-V System-on-Chip (SoC) mimarisinin temel bileşenlerini, çip üstü hata ayıklama modülünü ve bu bileşenler arasındaki iletişim yollarını göstermektedir.



Şekil 1. SoC Blok diyagram.

Figure 1. SoC Block diagram.

Tasarlanan RISC-V işlemcisi, buyruk ve veri önbelleği olarak iki ayrı önbellek bloğuna sahiptir. Bu önbellekler, işlemcinin verimliliğini artırmak ve gerekli verileri hızlı bir şekilde erişilebilir kılmak için kullanılmaktadır. Çip üstü hata ayıklama modülü, JTAG arayüzü üzerinden dışarıdan gelen hata ayıklama komutlarını almaktadır ve işlemci üzerinde uygun hata ayıklama işlemlerini gerçekleştirmektedir. Çip üstü RAM bloğu, işlemci tarafından hızlı veri depolama ve erişim için kullanılmaktadır. AHB (Advanced High-performance Bus) – APB (Advanced Peripheral Bus) köprüsü, farklı hızlarda çalışan iki veriyolu olan AHB ve APB arasında veri aktarımını sağlamaktadır. Köprü, sistem içi iletişimde verimliliği artırarak farklı bileşenler arası veri akışını düzenlemektedir.

AHB veriyolu, yüksek performanslı veri transferleri için tasarlanmıştır ve işlemci ile sistemdeki diğer yüksek hızlı bileşenler arasında veri taşıma işlevini üstlenmektedir.

SoC; SPI, I2C, UART ve GPIO gibi çeşitli standart çevresel ara birimlerle donatılmıştır. Bu ara birimler, FPGA'nın dış dünya ile etkileşimini sağlamaktadır ve çeşitli giriş/çıkış işlemleri için kullanılmaktadır.

Bu çalışmada gerçekleştirilen RISC-V tabanlı SoC'e ait teknik özellikleri Tablo 1'de sıralanmıştır. Bu doğrultuda, Şekil 2'de görüldüğü gibi tasarlanan SoC, FPGA üzerinde bulunan mantık elemanlarının %98.46'sı (48.552/49.760) aktif olarak kullanılmaktadır.

Tablo 1. RISC-V tabanlı SoC teknik özellikleri.

Table 1. RISC-V based SoC technical specifications.

Özellikler	Özellik Değeri
Buyruk Kümesi	RISC-V 32 (RV32IMAFBC_Zicsr_Zifence)
FPGA Kartı	Terasic De10-Lite
Donanım Tanımlama Dili	Verilog HDL
Çevre Birimleri	UART, GPIO, I2C, SPI
Veriyolu	AHB ve APB
Boru Hattı Aşama Sayısı	5 aşamalı CPU, 4 aşamalı FPU
Veri Önbelleği	48KB
Buyruk Önbelleği	128KB

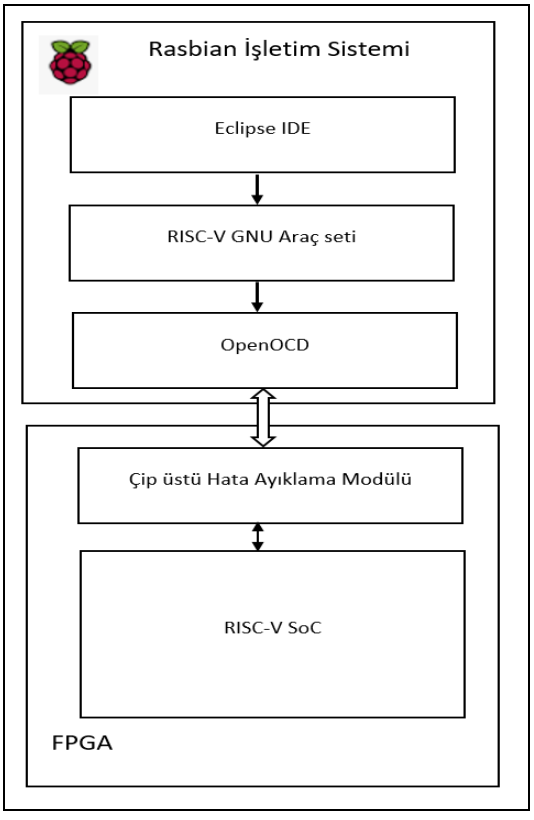
Family	MAX 10
Device	10M50DAF484C7G
Timing Models	Final
Total logic elements	48,522 / 49,760 (98 %)
Total registers	9846
Total pins	162 / 360 (45 %)
Total virtual pins	0
Total memory bits	918,528 / 1,677,312 (55 %)
Embedded Multiplier 9-bit elements	40 / 288 (14 %)
Total PLLs	1 / 4 (25 %)
UFM blocks	0 / 1 (0 %)
ADC blocks	0 / 2 (0 %)

Şekil 2. Kaynak kullanımı.

Figure 2. Resource utilization.

3 RISC-V SoC için hata ayıklama süreci

Şekil 3, FPGA tabanlı bir RISC-V System-on-Chip (SoC) üzerinde hata ayıklama sürecini tanımlamaktadır. Süreç, Raspbian işletim sistemi yüklü bir Raspberry Pi kullanılarak, Eclipse Integrated Development Environment (IDE) aracılığıyla yazılım kodunun geliştirilmesi ile başlamaktadır. Geliştirilen kod, RISC-V GNU Araç Seti kullanılarak derlenmektedir. OpenOCD, JTAG protokolünü kullanarak, çip üstü hata ayıklama modülüne erişim sağlamaktadır ve bu modül aracılığıyla derlenen programın yüklenmesini ve çalıştırılmasını koordine etmektedir. Çip üstü hata ayıklama modülü, yazılımın çalışma zamanı sırasında veri akışını izleme ve sistemin durumunu kontrol etme yeteneği sağlamaktadır. Böylece, hata ayıklama süreci sırasında programın davranışı üzerinde detaylı analizler gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 3. Hata ayıklama blok şeması.

Figure 3. Debugging block diagram.

Bu çalışma kapsamında, Tablo 2'de bulunan Raspberry Pi 4 Model B'nin GPIO pinleri, RISC-V tabanlı FPGA tasarımı üzerinde kapsamlı hata ayıklama ve programlama işlemleri gerçekleştirmek amacıyla JTAG arayüzü olarak yapılandırılmıştır. Geleneksel JTAG bağlantısının dört temel pini olan TCK (Test Clock), TMS (Test Mode Select), TDI (Test Data Input) ve TDO (Test Data Output), JTAG protokolünün ana işlevselliğini sağlamak üzere kullanılmıştır.

Tablo 2. Raspberry Pi 4 model B'nin GPIO pinlerinin OpenOCD JTAG hata ayıklayıcı olarak atanması.

Table 2. Assignment of Raspberry Pi 4 Model B GPIO pins as an OpenOCD JTAG debugger.

GPIO Pinleri	JTAG Pin
GPIO4	TDI
GPIO5	TDO
GPIO12	TMS
GPIO13	TCK

4 Testler

Bu bölümde, hata ayıklama süreci çerçevesinde işlemcinin çeşitli birimlerinin fonksiyonel doğruluğunu saptamak amacıyla yürütülen deneysel testler ele alınmaktadır.

4.1 Kayan nokta birimi testi

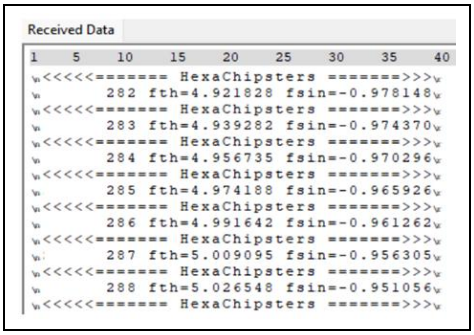
Bu test, işlemcinin Kayan Nokta Birimi (Floating Point Unit - FPU)'ni test etmektedir. Test kapsamında, FPU'nun matematiksel hesaplamaları ne derece doğru gerçekleştirebildiği değerlendirilmekte olup, özellikle sinüs fonksiyonu üzerinden örneklemeler yapılmaktadır. Program, Tablo 3'te belirlenen açılara karşılık gelen sinüs değerlerini hesaplayarak bu sonuçları seri terminale aktarmaktadır.

Tablo 3. FPU birimi ile hesaplanan sinüs fonksiyonun değerleri.

Table 3. Sine function values calculated by the FPU unit.

Derece	Radyan (teta)	Sinüs değeri (sin(teta))
282	4.921828	-0.978148
283	4.939282	-0.974370
284	4.956735	-0.970296
285	4.974188	-0.965926
286	4.991642	-0.961262
287	5.009095	-0.956305
288	5.026548	-0.951056

Geliştirilen FPU biriminin performansı ve doğruluğu, seri terminal üzerinden alınan çıktılarla değerlendirilmekte ve elde edilen veriler Şekil 4'te görselleştirilmektedir.



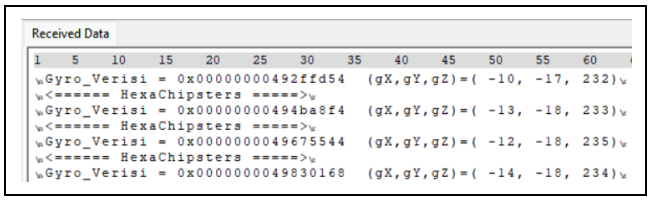
Şekil 4. Seri terminal üzerinden alınan sinüs fonksiyonun değerleri.

Figure 4. Sine function values received from the serial terminal.

Hata payları, işlemcinin sinüs fonksiyonunu hesaplama kabiliyetinin doğruluğunu yansıtan önemli bir göstergedir. Testler sonucunda, FPU biriminin genel olarak 10^{-7} ve 10^{-8} mertebesinde oldukça düşük hata payları ile sinüs değerlerini hesapladığı gözlemlenmiştir. Bu hata oranları, birimin yüksek düzeyde doğruluk ve performansla çalıştığını göstermektedir.

4.2 I2C Çevre birimi testi

Bu test, I2C birimi aracılığıyla ADXL345 ivmeölçer sensöründen veri okuma işlemine odaklanmaktadır. ADXL345, üç eksenli bir hareket algılama sensörü olup, I2C arayüzü yoluyla veri alışverişinde bulunmaktadır. Bu deneme, I2C biriminin fonksiyonel doğruluğunu ve sensörden elde edilen verilerin uygun şekilde işlenip işlenmediğini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Test sonuçları ve elde edilen verilerin doğruluğu, seri terminal üzerinden alınan çıktılar Şekil 5'te görselleştirilmiştir.



Şekil 5. I2C birimi üzerinden toplanan ivmeölçer verileri.

Figure 5. Accelerometer data collected via I2C unit.

Test süreci, I2C haberleşme protokolünün fonksiyonel doğruluğunu değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Test kapsamında, ADXL345 ivmeölçer sensörü ile işlemci arasındaki veri alışverişi analiz edilerek, protokolün güvenilirliği ve stabilitesi incelenmiştir. Öncelikle, I2C iletişiminin başarıyla kurulduğu doğrulanmış ve sensörün kimlik doğrulama (WHO_AM_I) register'ından okunan veri, üretici tarafından belirlenen referans değerleriyle karşılaştırılmıştır. I2C protokolünün güvenilirliği, ACK/NACK sinyallerinin analizi ile incelenmiş ve her veri iletimi sonrasında beklenen ACK sinyallerinin alındığı gözlemlenmiştir.

Ardından ADXL345 ivmeölçer sensörü, durağan bir yüzeye yerleştirilerek herhangi bir hareket uygulanmadan ölçümler alınmış ve yerçekimi ivmesinin etkileri göz önünde bulundurularak X, Y ve Z eksenlerinden elde edilen değerlerin beklenen sınırlar içinde olduğu doğrulanmıştır. Ayrıca, sensörden alınan bilgilerin doğruluğunu test etmek amacıyla dinamik hareket testleri de gerçekleştirilmiştir. Sensör farklı yönlerde belirli açılarla döndürülerek ve belirli hızlarda hareket ettirilerek, sensörden gelen verilerin fiziksel hareketle uyumlu olup olmadığı değerlendirilmiştir. Hareketin yönüne ve hızına bağlı olarak X, Y ve Z eksenlerindeki ivme değerlerinin değişimi gözlemlenmiş ve ölçümlerin beklendiği gibi olduğu doğrulanmıştır. Bu, I2C veri iletiminin yalnızca kesintisiz olmadığını, aynı zamanda sensörden alınan verilerin de fiziksel gerçeklikle uyumlu olduğunu kanıtlamaktadır.

4.3 Bit Manipülasyon işlemlerinin doğrulanması

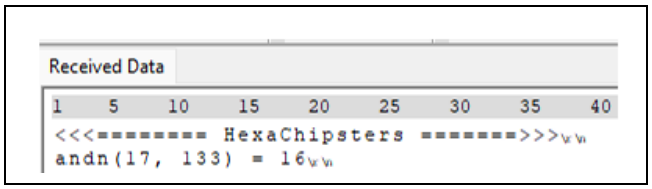
Şekil 6'dan da görüldüğü gibi bu test, işlemci üzerinde çalıştırılan ve bit manipülasyon komutlarını içeren örnek bir Inline Assembly koduyla gerçekleştirilmiştir. Inline Assembly, düşük seviyeli assembly dilinde yazılmış kod parçalarının yüksek seviye programlama dilleri içerisine entegre edilmesi sürecidir. Kodun işlevselliği, UART çıkışı üzerinden elde edilen

verilerle detaylı bir şekilde kontrol edilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 7'de görselleştirilmiştir.

```
uint32_t a = 0x11;  // 'a' değişkeni 0x11 (17)
uint32_t b = 0x85;  // 'b' değişkeni 0x85 (133)
uint32_t result;    // Sonucun atanacağı değişken
asm volatile ("andn %0, %1, %2" : "=r" (result) : "r" (a), "r" (b));
printf("andn(%d, %d)= %d\n", a, b, result;
```

Şekil 6. Örnek inline assembly kodu.

Figure 6. Sample ınline assembly code.



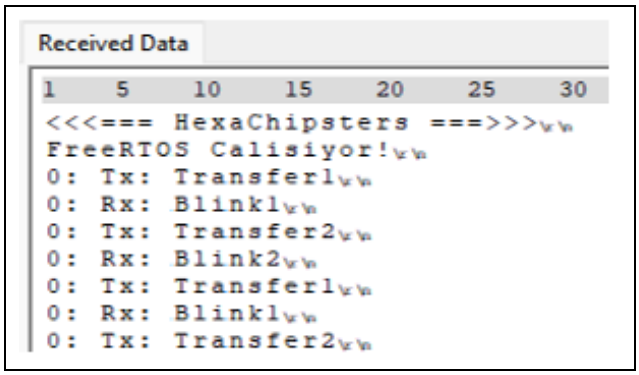
Şekil 7. Bit Manipülasyon işleminin UART birimine aktarılan çıktısı.

Figure 7. Output of the Bit Manipulation process transferred to the UART unit.

Bit seviyesinde işlem yapmayı sağlayan ANDN (Bitwise AND NOT) komutu, belirlenen değişkenler (a ve b) üzerinde uygulanmış ve sonuç, UART çıkışı üzerinden elde edilen verilerle doğrulanmıştır. Burada, a değişkeninin tüm bitleri ters çevrilmekte (NOT işlemi uygulanmakta) ve ardından b değişkeni ile bitwise AND işlemi yapılmaktadır. Matematiksel olarak hesaplanan değer 16 (0x10)'dur. Şekil 7'de UART üzerinden alınan çıktı da andn (17,133)=16 olarak gözlemlenmiştir. Kodun farklı değişken değerleri ile test edilmesi sonucu, ANDN komutunun işlemci üzerinde tutarlı bir şekilde çalıştığı görülmüştür.

4.4 FreeRTOS uygulamasi ve atomik işlemler testi

Bu test, işlemci üzerinde FreeRTOS'un çalışmasını ve Atomik işlemler ile CSR (Control and Status Registers) birimlerinin doğru işleyişini değerlendirmektedir. FreeRTOS, gömülü sistemler için tasarlanmış gerçek zamanlı bir işletim sistemidir. Test kapsamında, tipik bir FreeRTOS uygulaması çalıştırılmış. Çalıştırılan uygulama, atomik işlemler ile CSR kullanımlarını içermektedir. FreeRTOS uygulamasında 3 ayrı görev çalıştırılmıştır: Birinci görev UART birimindeki alma (receive) işlemidir. İkinci görev UART birimindeki gönderme (transmit) işlemidir. Üçüncü görev donanım kesme (IRQ) kontrol işlemidir.



Şekil 8. FreeRTOS'un görevlerinin UART biriminde gösterilmesi.

Figure 8. Representation of FreeRTOS tasks in the UART unit.

Şekil 8'deki test sonuçları, FreeRTOS'un çalışma durumunun başarılı bir şekilde doğrulandığını göstermektedir. Terminal çıktılarında görülen "FreeRTOS Çalışıyor!" mesajı, sistemin başlatıldığını ve işletim sisteminin görev yönetim mekanizmasının aktif hale geldiğini kanıtlamaktadır. UART üzerinden elde edilen verilere göre, FreeRTOS üzerinde çalışan belirli görevlerin düzenli bir şekilde yürütüldüğü gözlemlenmiştir. Transmit (Tx) görevleri "Transfer1" ve "Transfer2" mesajlarını belirli bir sırayla gönderirken, Receive (Rx) görevleri "Blink1" ve "Blink2" mesajlarını almaktadır. Bu düzenli veri akışı, FreeRTOS'un görev planlayıcısının (scheduler) periyodik olarak görevleri çalıştırdığını ve sistemde tanımlanan görevlerin planlanan önceliklere göre yürütüldüğünü göstermektedir. Bunun yanı sıra, terminal çıktılarında gözlemlenen "Rx: Blink1" ve "Rx: Blink2" mesajlarının yalnızca butona basıldığında ortaya çıkması, sistemde bir donanım kesme (IRQ) mekanizmasının aktif olarak çalıştığını kanıtlamaktadır.

4.5 Coremark ve Dhrystone testi

Bu aşamada, işlemcinin performansını değerlendirmek amacıyla özel test programları (benchmarklar) kullanılmıştır [19],[20]. Bu benchmarklar, işlem süresi, bellek kullanımı ve diğer kritik parametreleri ölçmek için tasarlanmıştır. Dhrystone, özellikle tam sayı işlemleri üzerine odaklanmış bir benchmark olup, kayan nokta işlemleri içermez ve tam sayı işlemleri yapan işlemcilerin performansını ölçmek için kullanılmaktadır. Ancak, Dhrystone testi bazı sınırlamalara sahiptir ve derleyici optimizasyonlarının etkisine oldukça duyarlıdır. Bu nedenle, işlemci performansını daha kapsamlı değerlendirmek için CoreMark benchmarkı tercih edilmiştir. CoreMark, matris işlemleri, veri bütünlüğü hesaplamaları ve tam sayı çarpma ve bölme işlemleri gibi çeşitli işlemleri içeren bir dizi iterasyonu kapsamaktadır. CoreMark, Dhrystone'a kıyasla daha objektif bir değerlendirme yapabilmekte ve işlemcinin öngörülen kullanım alanlarındaki işlem türlerine daha uygun bir test yöntemi sunmaktadır. Ayrıca CoreMark, derleyici optimizasyonlarının test sonuçlarına etkisine daha az duyarlıdır. Bu özellikleri ile CoreMark, daha tutarlı ve karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilmesine olanak tanımaktadır.

Tablo 4, çeşitli mikroişlemci ve mikrodenetleyici birimlerinin saat hızı başına düşen CoreMark performanslarını karşılaştırmaktadır. CoreMark, saniyede gerçekleştirilen iterasyon sayısını ölçen bir kıyaslama testi olarak kullanılmıştır. Ancak bu parametre işlemci frekansına bağlı olduğundan, farklı işlemcilerin doğrudan karşılaştırılması için ideal olmayabilir. Bu nedenle, performans değerlendirmeleri genellikle CoreMark/MHz olarak ifade edilmekte, bu hesaplama yöntemi farklı işlem hızlarına sahip cihazlar arasında daha adil bir karşılaştırma imkânı sunmaktadır.

Bu çalışmada performans değerlendirmesi, CoreMark ve Dhrystone kıyaslama testleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. CoreMark testi sonucunda, işlemci 16,66 MHz saat frekansında 600 iterasyon üzerinden 41,97 iterasyon/saniye değeri elde etmiştir. Elde edilen CoreMark/MHz oranı 2,51 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, riscv64-unknown-elf-gcc derleyicisinin 8.6.0 versiyonu ile elde edilmiştir.

Dhrystone testi sonucunda ise işlemci, 70,582 Dhrystone/saniye işlem kapasitesine ulaşmıştır. Her bir Dhrystone işleminin tamamlanması için gereken süre 14,167 mikrosaniye olarak ölçülmüştür. İşlemcinin saat hızı 16,66 MHz olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada, işlemcinin performansını değerlendirmek amacıyla elde edilen sonuçlar, farklı mimarilere sahip gömülü işlemcilerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma için seçilen işlemciler, gömülü sistemlerde yaygın olarak kullanılan ve farklı performans seviyelerini temsil eden işlemciler arasından belirlenmiştir. Güncel mikroişlemcilerin CoreMark/MHz değerlerine erişmek için Embedded Microprocessor Benchmark Consortium (EEMBC) tarafından sunulan resmi veritabanı, bağımsız araştırmacılar tarafından yürütülen testler ve açık kaynak toplulukları tarafından paylaşılan benchmark sonuçları da güncel işlemcilerin performans verilerini sağlamaktadır [21],[22].

Tablo 4'te belirtildiği üzere, çeşitli kartlar arasında yapılan karşılaştırmada; Atmega 2560 işlemcisine sahip Arduino MEGA 2560; 0,44 CoreMark/MHz değeri ile en düşük performansı sergilerken, ARM Cortex-M3 işlemcili STM32F103C8T6 ve ARM Cortex-M4 işlemcili STM32F411CEU6 sırasıyla 1,13 ve 1,79 CoreMark/MHz değerleri ile orta düzey performans göstermiştir [21],[22]. Bu çalışmada geliştirilen RISC-V tabanlı işlemci, ESP8266 ve ARM11 işlemcili Raspberry Pi Model B v2 gibi yüksek performans gösteren diğer gömülü sistemlerle rekabet edebilecek bir performans sergilemiştir [21,22]. Bu performans düzeyi, işlemciyi hem çok yönlü gömülü sistem uygulamaları hem de yüksek veri işleme gereksinimi duyan gelişmiş projeler için uygun bir seçenek haline getirmektedir.

Tablo 4. Performans karşılaştırması (CoreMark/MHz).

Table 4. Performance comparison (CoreMark/MHz).

Kart Modeli	İşlemci	Frekans	CoreMark/ MHz
Arduino MEGA 2560	Atmega 2560	16	0,44
STM32F103C8T6	ARM Cortex-M3	72	1,13
STM32F401CCU6	ARM Cortex-M4	84	1,79
STM32F411CEU6	ARM Cortex-M4	172	1,72
Bu çalışma	**RISC-V**	**16,66**	**2,51**
Raspberry Pi Model B v2	ARM11	700	2,25
	ESP8266	80	2,375

Dhrystone benchmark performans hesaplamalarında yaygın olarak kullanılan VAX-11/780 işlemcisi baz alınarak 1 DMIPS = 1757 Dhrystone/s referans değeri kullanılarak işlemcinin Dhrystone MIPS (DMIPS) değeri hesaplanmıştır [23]. Bu çalışmada, işlemcinin 40,17 DMIPS performansı sunduğu hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, bu çalışöadaki işlemcinin DMIPS ve DMIPS/MHz değerleri açısından gömülü sistemlerde yaygın olarak kullanılan bazı işlemcilerle Tablo 5'teki gibi karşılaştırılmıştır [24]-[28].

Tablo 5. Performans karşılaştırması (DMIPS & DMIPS/MHz).

Table 5. Performance comparison (DMIPS & DMIPS/MHz).

İşlemci	Saat Hızı(MHz)	DMIPS/MHz	Toplam DMIPS
ARM Cortex-M3	50 MHz	1,50	75,0
ARM Cortex-M4	80 MHz	1,52	121,6
PicoRV32	100 MHz	0,355	35,5
ORCA	100 MHz	1,589	158,9
Bu çalışma	16.66	2,41	40,17

Ancak, toplam işlem kapasitesi değerlendirilirken yalnızca DMIPS/MHz değil, işlemcinin saat frekansının da dikkate alınması gerekmektedir. Daha bütüncül bir değerlendirme için, çeşitli kriterlerin birlikte ele alınması gerekmektedir. Örneğin, DMIPS/MHz, saat hızından bağımsız olarak işlemcinin işlem verimliliğini gösterirken; toplam DMIPS, işlemcinin belirli bir frekansta sunabildiği mutlak işlem gücünü ifade eder. DMIPS/Watt, özellikle IoT ve mobil sistemler gibi düşük güç tüketimi gerektiren uygulamalarda, güç verimliliğini değerlendirmek için önemlidir [24]-[26].

5 Sonuçlar

Bu çalışmada gerçekleştirilen FPGA prototipleme, RISC-V tabanlı SoC tasarımlarının ön-silikon doğrulama sürecinde, geleneksel yöntemlere kıyasla gerçek donanım koşullarında kapsamlı testler sağlaması açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Elde edilen test sonuçları, daha önce sunulan CoreMark test sonuçlarıyla uyumlu olarak, tasarlanan sistemin yüksek performansını ve kararlılığını kanıtlamaktadır. Çalışmada incelenen RISC-V tabanlı SoC, diğer yüksek performanslı gömülü sistemlerle rekabet edebilecek düzeyde performans sergilemiş, bu da gerçeklenen SoC'nin çok yönlü gömülü sistem uygulamaları için uygun bir seçenek olduğunu göstermektedir.

Bu sonuçlar, FPGA prototipleme kullanılarak, nihai silikon tasarıma geçiş öncesinde karşılaşılabilecek risklerin minimize edilmesine ve geliştirme maliyetlerinin azaltılmasına olanak tanıdığını vurgulamaktadır. Ancak bu yöntem, geleneksel simülasyon tekniklerine göre daha yüksek başlangıç yatırımı gerektirir. Başlangıçta daha büyük bir maliyet gibi görünse de, prototipleme sürecinde erken hata tespiti yapılabilmesi ve gerçek donanım üzerinde doğrulama yapılabilmesi, uzun vadede tasarımın daha ekonomik ve güvenilir olmasını sağlamaktadır. Bu nedenle, başlangıçtaki yüksek yatırım maliyeti, nihai ürünün kalitesini ve piyasaya sürülme süresini iyileştirerek telafi edilebilir. Bu da özellikle karmaşık sistemlerde ve yüksek güvenilirlik gerektiren uygulamalarda kritik bir avantaj olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışmalarda, FPGA prototipi sabit bir saat frekansı altında test edilmiş olup, daha ileri değerlendirmelerde farklı frekans ve termal koşullarda sistemin davranışı incelenerek kararlılık ve ölçeklenebilirlik analizleri yapılması planlanmaktadır.

Gelecekteki çalışmalar için, RISC-V mimarisinin modüler yapısından yararlanarak yapay zekâ ve derin öğrenme uygulamalarına yönelik özelleştirilmiş işlemci çekirdeklerinin tasarımı ve geliştirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, özellikle IoT cihazları için düşük güç tüketimine sahip, enerji verimliliği yüksek işlemci çekirdeklerinin geliştirilmesi, bu mimarinin kullanım alanını genişletecek ve endüstriyel ile tüketici elektroniği pazarlarında önemli etkiler yaratabilecektir.

6 Conclusions

This study highlights significant advantages of FPGA prototyping in the pre-silicon validation process of RISC-V based SoC designs, offering comprehensive testing in real hardware conditions compared to traditional methods. The test results obtained are consistent with previously presented CoreMark test outcomes, demonstrating the high performance and stability of the designed system. The RISC-V based SoC examined in this study has shown performance levels competitive with other high-performance embedded systems, indicating that the realized SoC is a suitable option for versatile embedded system applications.

These findings emphasize that FPGA prototyping can minimize risks encountered before transitioning to final silicon design and reduce development costs. However, this method requires a higher initial investment compared to traditional simulation techniques. Although this may seem like a higher cost at the outset, the ability to detect errors early in the prototyping process and validate on actual hardware ensures that the design is more economical and reliable in the long run. Therefore, the initial high investment cost can be justified by improving the quality of the final product and the time to market. This is especially critical in complex systems and applications requiring high reliability.

In this study, the FPGA prototype was tested under a fixed clock frequency, and further evaluations are planned to analyze the stability and scalability by examining the behavior of the system under different frequency and thermal conditions.

For future studies, it is recommended to utilize the modular structure of the RISC-V architecture to design and develop customized processor cores for artificial intelligence and deep learning applications. Additionally, the development of low power consumption, high energy efficiency processor cores, particularly for IoT devices, will expand the usage of this architecture and could have significant impacts in industrial and consumer electronics markets.

7 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Sezen Bal literatür taraması ve elde edilen sonuçların değerlendirilmesi; Hayriye Korkmaz yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi; Doğukan Biçer, Celal Alperen Bayar, Eren Kale, Eray Kayailli, Armağan Bi tasarımın gerçekleştirilmesi ve test aşamalarında katkı sunmuşlardır.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur". "Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır".

9 Kaynaklar

[1] Farooq U, Mehrez H. "Pre-Silicon verification using multi-FPGA platforms: a review". *Journal of Electron Testing*, 37(1), 7–24, 2021.

[2] Korkmaz N. "Fitzhugh-Nagumo nöron modelinin rotasyon-geçiş prosedürü ve donanım doğrulaması". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(3), 316–323, 2024.

[3] Zang Z, Liu Y, Cheung RCC. "Reconfigurable RISC-V secure processor and SoC integration". *2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Melbourne, Australia, 13–15 February 2019.

[4] University of California, Berkeley. "RISC-V Project". https://riscv.org/about/history/ (07.01.2024).

[5] Cui E, Li T, Wei Q. "RISC-V ınstruction set architecture extensions: a survey". *IEEE Access*, 11, 24696–24711, 2023.

[6] RISC-V Foundation. "RISC-V ISA Manual". https://github.com/riscv/riscv-isa-manual (12.01.2025).

[7] Singh A, Kumar A, Singh A, Anirudh R, Pushpalatha KN. "Design and implementation of RISC-V ISA (RV32IM) on FPGA". *International Journal of VLSI & Signal Processing*, 10, 17–21, 2023.

[8] Wang X, Zhou L, Li Y, Zhang P, Lin H, Xu J. "xBGAS: a global address space extension on RISC-V for high performance computing". *2021 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS)*, Portland, OR, USA, 28 June 2021.

[9] Chen J, Li D, Mi Z, Liu Y, Zang B, Guan H, Chen H. "Du-visor: a user-level hypervisor through delegated virtualization". https://github.com/IPADS-DuVisor/DuVisor (02.10.2025).

[10] Tine B, Yalamarthy KP, Elsabbagh F, Kim H. "Vortex: extending the RISC-V ISA for GPGPU and 3D-Graphics". *54th Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture (MICRO '21)*, Athens, Greece, 17–21 October 2021.

[11] RISC-V International. "RISC-V Debug Specification". https://riscv.org/wp-content/uploads/2019/03/riscv-debug-release.pdf (07.01.2024).

[12] Poli L, Saha S, Zhai X, Mcdonald-Maier KD. "Design and Implementation of a RISC-V Processor on FPGA". *2021 17th International Conference on Mobility, Sensing and Networking (MSN)*, Exeter, United Kingdom, 13–15 December 2021.

[13] Pilavendiran SA, Keshavarajan JL, Vijayakumar S. "Design and development of JTAG using raspberry pi". *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 4, 75–79, 2020.

[14] Rico-García P, Yañez-Vargas JI, Parra-Michel R, Conde-Almada E. "Debugging and programming a RISC-V processor using the IEEE 1149.1 standard". *Journal of Applied Computing*, 7(21), 1–9, 2023.

[15] Salehi M, Degani L, Roveri M, Hughes D, Crispo B. "Discovery and Identification of Memory Corruption Vulnerabilities on Bare-Metal Embedded Devices". *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 20(2), 1124–1138, 2023.

[16] OpenOCD. "Open On-Chip Debugger". https://openocd.org/doc/pdf/openocd.pdf (20.01.2024).

[17] Gao S, Wu D, Xiao W, Wang Z, Yang Z, Gao W. "A novel method for on-chip debugging based on RISC-V processor". *MATEC Web of Conferences*, 355, 03055, 2022.

[18] Toker O. "A high-level synthesis approach for a RISC-V RV32I-Based system on chip and its FPGA implementation". *Engineering Proceedings*, 58(1), 72, 2023.

[19] Heinz C, Lavan Y, Hofmann J, Koch A. "A catalog and ın-hardware evaluation of open-source drop-in compatible RISC-V Softcore Processors". *2019 International Conference on ReConFigurable Computing and FPGAs*, Cancun, Mexico, 9–11 December 2019.

[20] Elsadek I, Tawfik EY. "RISC-V resource-constrained cores: a survey and energy comparison". *19th IEEE International New Circuits and Systems Conference*, Toulon, France, 13–16 June 2021.

[21] EEMBC (Embedded Microprocessor Benchmark Consortium). "CoreMark Benchmark". www.eembc.org (15.01.2025).

[22] Kreier R. "CoreMark Benchmarking Overview". https://kreier.github.io/benchmark/CoreMark/ (15.03.2025).

[23] Weicker R. "Dhrystone: a synthetic benchmark". *Communications of the ACM*, 27(10), 1013–1030, 1984.

[24] Mo W, Liu J, Wang Y, Yan F, Xiong B, Guan J. "An SDPF RISC-V processor with 55.9% dhrystone ımprovement using two-stage pseudo-pipelined architecture for IoT applications". *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2025. https://doi.org/10.1002/cta.4514

[25] Bora S, Paily R. "A high-performance core micro-architecture based on RISC-V ISA for low power applications". *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 68(6), 2132–2136, 2021.

[26] ORCA. "A RISC-V Processor for FPGA Evaluation. GitHub Repository". https://github.com/riscveval/orca-1 (15.03.2025).

[27] PicoRV32. "A Size-Optimized RISC-V CPU Core. GitHub Repository". https://github.com/YosysHQ/picorv32 (15.03.2025).

[28] mmRISC-1. "A Minimal RISC-V CPU Implementation. GitHub Repository". https://github.com/munetomo-maruyama/mmRISC-1 (01.01.2024).

Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 31(7), 1307-1320, 2025

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Polybrominated diphenyl ethers in surface water sources and sediments of the Konya Closed Basin and environmental risk assessment

Konya Kapalı Havzası yüzeysel su kaynakları su ve sedimentlerinde polibromlu difenil eterler ve çevresel risk değerlendirmesi

Arzu Ulvi[1*], *Senar Aydin*[1], *Mehmet Emin Aydin*[2]

[1]Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Necmettin Erbakan University, Konya, Türkiye.
atekinay@erbakan.edu.tr, sozcan@erbakan.edu.tr

[2]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Necmettin Erbakan University, Konya Türkiye.
meaydin@erbakan.edu.tr

Received/Geliş Tarihi: 08.12.2024 Revision/Düzeltme Tarihi: 10.04.2025 doi: 10.5505/pajes.2025.68639
Accepted/Kabul Tarihi: 14.04.2025 Research Article/Araştırma Makalesi

Abstract

Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs), which are potentially toxic, are still detected in the environment at ppb levels, despite being banned or restricted in use. In this study, 38 surface water and 28 sediments were taken from 46 sources in the Konya Closed Basin, Türkiye. The samples were investigated for pollution by PBDE congeners (PBDE47, PBDE100, PBDE99, PBDE154, PBDE153). A risk assessment was carried out using the concentrations detected in the water samples for fish, Daphnia magna, and algae. Total PBDE concentrations were determined to be between 0.96-74.5 ng/L in surface water, and between 0.01-0.64 µg/kg dry weight in sediment samples. PBDE47 congener is dominant in water samples, while PBDE100, PBDE153, and PBDE47 dominant in sediment samples. PBDE47 congener poses a high risk for fish, Daphnia magna, and algae in two surface water sources, PBDE154 and PBDE153 pose a high risk for fish in three surface water sources, PBDE154 poses a high risk for Daphnia magna in two, and PBDE153 poses a high risk for Daphnia magna in three surface water sources. The results show that PBDE pollution is present in the surface waters of Konya Closed Basin at levels affecting aquatic life. Water in the basin is used for many purposes, primarily drinking and agricultural irrigation. Commercial products containing PBDE are still in use and are creating waste. An effective waste management plan should be implemented, and micropollutants, including PBDEs, should be regularly monitored in environmental media.

Keyword: Surface Water Source, Sediment, Polybrominated Diphenyl Ether, PBDE, Pollution, Risk.

Öz

Yüksek kalıcılık ve biyoakümülasyon gösteren, potansiyel olarak toksik olan polibromlu difenil eterler (PBDEs), kullanımları yasaklanmış veya kısıtlanmış olmalarına rağmen, çevrede hala ppb seviyelerinde tespit edilmektedir. Bu çalışmada Konya Kapalı Havzasında bulunan 46 yüzeysel su kaynağından 38 yüzeysel su ve 28 sediment örneği alınmıştır. Alınan örneklerde PBDE (PBDE47, PBDE100, PBDE99, PBDE154, PBDE153) kirliliği araştırılmıştır. Su numunelerinde tespit edilen konsantrasyonlar ile balık, Daphnia magna ve alg için risk değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Su numunelerinde toplam PBDE konsantrasyonları 0.96-74.5 ng/L aralığında, sediment numunelerinde 0.01-0.64 µg/kg kuru ağırlık aralığında tespit edilmiştir. Su numunelerinde PBDE47 kongeneri baskın, sediment numunelerinde PBDE100, PBDE153, PBDE47 kongenerleri baskın tespit edilmiştir. PBDE47 kongeneri balık, Daphnia magna ve alg için iki yüzeysel su kaynağında yüksek dereceli risk, PBDE154 ve PBDE153 balık için üç yüzeysel su kaynağında yüksek dereceli risk, PBDE154 Daphnia magna için iki, PBDE153 Daphnia magna için üç yüzeysel su kaynağında yüksek dereceli risk sergilemektedir. Sonuçlar göstermiştir ki, Konya Kapalı Havzasında bulunan yüzeysel sularda PBDE kirliği akuatik yaşamı etkileyecek derecede mevcuttur. Havzadaki sular içme, tarımsal sulama başta olmak üzere pek çok amaç için kullanılmaktadır. PBDE içeren ticari ürünler halen kullanımdadır ve atık oluşturmaktadır. Özellikle elektronik atıklar için etkili bir atık yönetim planı uygulanmalı, PBDE'ler de dahil olmak üzere mikrokirleticiler çevresel ortamlarda düzenli olarak izlenmelidir.

Anahtar kelimeler: Yüzeysel Su Kaynağı, Sediment, Polibromlu Difenil Eter, PBDE, Kirlilik, Risk.

1 Introduction

The quality of water is deteriorating due to natural and anthropogenic sources. Population growth, rapid development of industry, discharge of waste to the receiving environment without treatment, pesticides and fertilization cause water pollution. The most common pollutants in water resources are nitrate, nitrite, ammonia, heavy metals and toxic compounds [1],[2]. Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) are used as fire retardants. They are used in a wide range of products, including building materials, upholstery foam, electrical and electronic equipment, furniture, motor vehicles, aircraft, plastics, polyurethane foams, and textiles [3]. Because of their low cost and excellent flame-retardant effects, PBDEs have been manufactured about 1.5 million tons since the 1970s in global [4],[5]. Routes of entry of PBDEs into the environment are their production, use, and disposal methods such as incineration of waste, storage in landfills, or discharge to urban wastewater treatment plants [3],[6]. There are 209 PBDE congeners which depend on the number of bromine atoms and their position in the aromatic ring. PBDEs are commercially available as three technical mixtures: penta-BDE, octa-BDE, deca-BDE [7],[8]. Penta-BDE, octa-BDE technical mixtures are mostly used in polyurethane foam materials, and deca-BDE technical mixtures are used in electronic materials [9]. Penta-BDE and octa-BDE in 2009, deca-BDE in 2017 were added to the Stockholm Convention. The Stockholm Convention bans or limits the use of persistent organic pollutants [10]. However,

*Corresponding author/Yazışılan Yazar

the commercial congener deca-BDE is still produced and used in the production of cars, trucks and aircraft in some countries [11],[12]. Countries that are parties to the Stockholm Convention are obliged to eliminate PBDE production or reduce their emissions to the environment [13]. Although PBDEs are banned, they are found in trace concentrations in the environment. Studies show that PBDEs are persistent, long-term transportable, bioaccumulating, and toxic compounds in the environment. They have lipophilic characters and so they accumulate in fatty structure. [11]. In many studies, the presence of PBDE compounds has been detected in various environments [14]-[17]. PBDEs have also been detected in human samples such as breast milk, serum, placenta, and adipose tissue [11],[18],[19]. The bioaccumulation and biomagnification potentials of PBDE congeners are affected by their octanol-water coefficients (logKow) and whether the food web is on land or in water. Logkow values of tetra-BDE and penta-BDE congeners are between 5.9 and 7.2, and they have the greatest biomagnification potential [20], [21]. Among PBDE congeners, highly brominated PBDEs are less toxic than low-brominated PBDE [7]. In addition, low-brominated PBDEs are more mobile in the environment and thus enter the food chain more easily [12]. PBDE congeners may affect thyroid hormones, liver enzymes, and cause DNA damage [7],[14]. PBDEs are designated as group 3 by the International Agency for Research on Cancer (IARC). It is meaning, they are not classifiable as human carcinogens; however, the EPA (Environmental Protection Agency) classified the deca-BDE congener as a compound with suggestive evidence of carcinogenic potential. Despite the potential toxic effects of PBDEs, tolerable ingestion doses of these contaminants are not yet available [22]. Water resources are one of the important environmental media. It can be easily exposed to environmental pollutants. Pollutants found in water can affect both aquatic organisms and other terrestrial organisms, including humans, through the food chain. PBDEs are important environmental pollutants that need to be investigated as explained above. In the Konya Closed Basin Management Plan, PBDE (28, 47, 100, 99, 153, 154) in 16 surface water sources in the basin exceeded the environmental quality standard (140 ng/L) given in the Surface Water Quality Regulation. In surface water sources exceeding environmental quality standard, PBDEs were detected in the range of 150-960 ng/L. The target date for reaching the environmental target in the report is stated as 2024 [23].

In this study, the concentrations of PBDE47, PBDE100, PBDE99, PBDE153, and PBDE154 congeners were investigated in 39 surface water and 28 sediment samples taken from the Konya Closed Basin. Additionally, the ecotoxicological risk exhibited by PBDE in surface water resources was evaluated for the test organism's algae, *Daphnia magna*, and fish.

2 Materials and methods

2.1 Water and sediment samples

The Konya Closed Basin in the middle of Türkiye is situated between latitudes 36°51'N and 39°29'N and longitudes 31°36'E and 34°52'E. The basin includes land from 9 provinces. The urban population is 2150514, the rural population is 618695, resulting in a total of 2768900 people living within the basin borders. 57% of the basin lands are agricultural lands, 33% are natural areas (steppe, anthropogenic steppe, forest), 7.9% are wetlands and water bodies, and 2% are artificial areas. The rivers in the Konya Closed Basin are mostly seasonal and flood in character. The streams are short due to the closed basin and topography; they disappear in the marshes on the plain. Stream regimes are irregular due to variability in rainfall, and most of them dry up in the summer. The basin, which includes Beyşehir with 34 lakes and 58 rivers, also includes Salt Lake. Salt Lake, which is the second largest lake in Türkiye, meets 40% of the country's salt demand. Beyşehir Lake is the third largest lake in Türkiye [23],[24]. The State Hydraulic Works have determined surveillance monitoring points for general purposes to monitor water resources that are not at risk. It has also identified operational monitoring points for water resources at risk, where priority substances are discharged, and protection areas within the basin, such as drinking water protection areas and habitat protection areas. Thirty-eight water samples and 28 sediment samples were taken from 46 surface water sources in the Konya Closed Basin. Samples could not be taken from some sample points due to field conditions and water source characteristics. The sampling points include 21 surveillance monitoring points, 18 operational monitoring points, and 2 protected areas. The sampled water resources are used for irrigation purposes in the Konya Closed Basin. Sampling was carried out once a year in April. Although April is expected to be a rainy month in Konya, no rain was observed during the sampling period. The most important pollution sources affecting water bodies in the basin are wastewater discharges, solid waste, agricultural areas, industrial facilities and residential areas. In the Konya Closed Basin Measures Program Summary Report, the potential pressures for PBDEs were stated as discharges from industrial facilities and urban discharges. Table 1 shows the surface water sources from which samples were taken. Figure 1 shows the sample points on the map.

2.2 PBDE analysis in water and sediment samples

Samples were kept at 4 °C until analyzed. No filtering process was applied to the water samples before extraction. PBDE analysis in water samples was performed using the liquid-liquid extraction method in accordance with US EPA Method 3510. A 200 mL water sample was placed in a 250 mL separating funnel. The extraction was carried out with 40 mL of dichloromethane. The separating funnel was shaken for 2 minutes. After allowing the organic layer to separate from the water phase, the next step is to carefully collect the separate layer. The extraction was repeated two times and organic phases were combined. The extracts were dried with anhydrous Na_2SO_4 and reduced to approximately 2 mL with a rotary evaporator. PBDE analysis in sediment samples was performed according to the DFG (German Research Association) S19 multi method. The extraction was carried out with an acetone-water mixture (2:1, v/v) using fifty grams of sediment sample in the dark for 12 hours at 221 rpm. After shaking, approximately 15 g sodium chloride and 100 mL cyclohexane were added and shaken for another 1h. After shaking, shaking approximately 120 mL aliquot of organic phase was taken and dried with 15 g of anhydrous Na_2SO_4. Subsequently, 100 mL of the organic phase was filtered and concentrated to 2 mL using a rotary evaporator. Then, the concentrated organic phase was cleaned up.

Water and sediment extracts were cleaned using the standard column chromatography technique according to US EPA Method 3630C; Silica Gel Cleanup. A glass column with a 1.5 cm diameter and 14.5 cm length was used with glass wool placed at the bottom.

Table 1. Surface water and sediment sampling points.

Sample number	Water sources	Monitoring Purpose	Water	Sediment
1	Dinamo stream	Surveillance	+	+
2	Sugla stream	Surveillance	+	+
3	Suludere stream	Surveillance	+	+
4	Ulucay stream	Surveillance	+	+
5	Agzıkarahan stream	Surveillance	+	+
6	Melendiz stream	Operational	+	+
7	Karasu stream	Operational	+	+
8	Ilısu river	Surveillance	+	+
9	Ulu Irmak stream	Surveillance	+	+
10	Insuyu stream	Operational	-	+
11	Ozdere stream	Operational	+	+
12	Yanarkac stream	Operational	+	+
13	Uçharman stream	Operational	+	+
14	Uludere Kavaklık stream	Surveillance	+	+
15	Yesildere Kızıllarağırı stream	Surveillance	+	+
16	Yesildere Nalima stream	Surveillance	+	-
17	Yesildere Akköprü stream	Operational	+	+
18	Bozyer stream	Surveillance	+	-
19	Dolav stream	Operational	+	-
20	Kurucay-Hoyuklu-Yazı stream	Surveillance	+	-
21	Donrul-Bag-Kocacay stream	Operational	+	+
22	Ilmen stream	Operational	+	-
23	Salur stream	Operational	+	-
24	Yenisarbademli stream	Surveillance	+	+
25	Derebucak dam	Surveillance	+	-
26	Kavakbasi stream	Operational	+	-
27	Beysehir stream	Operational	+	-
28	Battal stream	Surveillance	+	-
29	Kusla stream	Surveillance	+	-
30	Kırgecit stream	Surveillance	+	-
31	Çiftehan stream	Surveillance	+	-
32	Aydın Kent stream	Operational	+	-
33	Carsamba stream	Surveillance	+	-
34	Gök stream	Operational	+	+

Table 1. Continued.

Sample Number	Water Sources	Monitoring Purpose	Water	Sediment
35	Akkaya stream	Surveillance	+	-
36	Göksu river	Surveillance	+	-
37	Ecemis stream	Operational	+	+
38	May dam	Protected	+	+
39	Atlanti irrigation channel	Protected	+	-
40	Avşar dam	Operational	-	+
41	Hizar stream	Operational	-	+
42	Göktepe stream	Unstated	-	+
43	Bıçakcı stream	Unstated	-	+
44	Atınapa dam	Unstated	-	+
45	Tekke stream	Unstated	-	+
46	Kula stream	Unstated	-	+

+: Sampled, -: Not sampled.



Figure 1. Water and sediment sampling points in Konya closed basin

The column was cleaned with 50 mL of n-hexane and 50 mL of acetone. Silica gel in n-hexane was added to avoid air bubbles. 50 mL of n-hexane was used to condition the column. Elution was carried out with 70 mL of n-hexane followed by 100 mL of n-hexane/ethyl acetate (1/1, v/v) mixture. Eluents were collected separately. Eluents were concentrated with a rotary evaporator and nitrogen gas.

Qualitative and quantitative analyses of PBDEs were performed on a gas chromatograph (GC, Agilent 6890 N, Agilent Technologies, CA, USA) equipped with a mass selective detector (MSD, Agilent 5973, Agilent Technologies, CA, USA). A DB-5ms capillary column with 250 µm inner diameter, 0.25 µm film thickness, and 30 m length was used for chromatographic separation. Helium was used as the carrier gas.

2.3 Analytical performance

Table 2 presents the results of the limits of detection (LOD), limit of quantifications (LOQ), linear response range, linearity, and repeatability obtained with the GC-MS system for PBDE compounds. The LOD and LOQ values for PBDEs were calculated according to published guidelines at a signal-to-noise ratio (S/N) of 3 and 10, respectively [25]. The repeatability values for the target compounds in the MS detector were determined by calculating the %RSD (Relative Standard Deviation) of the MS responses from five injections of the standard solution at a concentration of 0.1 ng/µL. The repeatability was found to be between 1.2% and 3.1%. Analytical curves were drawn using eight PBDE standards within the concentration range of 0.001-1 ng/µL. The coefficient of determination (R^2) was in the range of 0.9997-0.9999.

Table 2. Analytical parameters of the GC-MS system for PBDEs

PBDEs	LOD (ng/L)	LOQ (ng/L)	Linear response range (ng/µL)	R^2	RSD
PBDE47	0.005	0.016	0.001-1	0.9998	1.2
PBDE100	0.006	0.020	0.001-1	0.9997	2.3
PBDE99	0.007	0.020	0.001-1	0.9999	2.4
PBDE154	0.006	0.020	0.001-1	0.9997	3.1
PBDE153	0.005	0.016	0.001-1	0.9998	2.7

For the recovery and precision assays, samples of surface water were spiked with PBDEs standards at the concentration of 0.1 µg/L and 1 µg/L. The extraction method was applied to both unfortified and fortified surface water samples. The average recoveries of all PBDEs in the surface waters fortified with 0.01 µg/L and 0.1 µg/L were 87% (±5)-99% (±5) and 93% (±5)-101% (±4), respectively (n=4). Also, samples of sediment were spiked with PBDEs standards at the concentration of 0.01 mg/kg and 0.1 mg/kg. The extraction method was applied to both unfortified and fortified sediment samples. The average recoveries of all PBDEs in the sediments spiked with 0.01 mg/kg and 0.1 mg/kg ranged from were 85% (±4)-94% (±6) and 92% (±3)-96% (±5), respectively (n = 4). When recoveries of PBDEs were gauged against absolute limits of 70% and 130% [26], it was seen that the extraction and clean-up method gave satisfactory results. The retention times and m/z values of the compounds are given in Table 3.

Table 3. Retention time and m/z value of PBDEs

PBDEs	Retention time, min	Ion (m/z value)
PBDE47	8.09	326, 486, 484
PBDE100	8.82	404, 406, 564
PBDE99	9.06	404, 406, 564
PBDE154	9.62	484, 482, 486
PBDE153	9.93	484, 482, 486

2.4 Risk assessment

The presence of hazardous substances in the aquatic environment may negatively affect the ecosystem. Risk refers to the likelihood of harmful effects occurring in an organism as a result of exposure to hazardous substances [27]. In the study, ecotoxicological risk was assessed using the risk quotient (RQ). Ecotoxicological risk assessment was conducted on fish, *Daphnia magna* and algae. Fish, *Daphnia magna* and algae are good indicators of aquatic toxicity. They represent three different trophic levels in the aquatic environment. The first trophic level, algae, is extremely sensitive to pollutants. *Daphnia magna,* which feeds on algae, is a natural food for fish [28].

The RQ is calculated as the quotient of the measured environmental concentration (MEC) divided by the predicted non-effect environmental concentration (PNEC) of the substance [29]. PNEC is the highest concentration of a substance in an environment at which it does not produce any effects. The PNEC is obtained by dividing the toxicological relevant concentration (EC_{50} or LC_{50} values) by a safety factor (f = 1000) [15]. EC_{50} or LD_{50} data of PBDE compounds used in this study were obtained from the literature. PNEC and RQ are calculated using equation (1) and equation (2), respectively.

$$PNEC = EC_{50} \text{or } LC_{50}/1000 \quad (1)$$

$$RQ = MEC/PNEC \quad (2)$$

Table 4 shows the PNEC values of PBDE for fish, *Daphnia magna*, and algae. When RQ <0.001, this means no risk. If 0.01 ≤ RQ<0.1, then this indicates a low risk. When 0.1 ≤ RQ < 1, it indicates a medium risk; when 1 ≤ RQ, it indicates a high risk [30].

Table 4. PNEC value of PBDEs [15],[30]

PBDEs	Fish (ng/L)	*Daphnia magna* (ng/L)	Algae (ng/L)
PBDE47	21	18	24
PBDE100	4	4	24
PBDE99	4	4	24
PBDE154	0.69	0.72	7
PBDE153	0.69	0.72	7

3 Results and discussion

3.1 PBDEs detected in water samples

The concentration of PBDEs in water samples has been presented in Figure 2. In water samples, PBDE congeners were detected in the range of 0.13-73.1 ng/L for PBDE47, in the range of 0.08-0.92 ng/L for PBDE100, in the range of 0.09-0.40 ng/L for PBDE99, in the range of 0.16-1.17 ng/L for PBDE154, and in the range of 0.12-1.46 ng/L for PBDE153. According to the environmental quality standards for rivers and lakes, the Surface Water Quality Regulation in force in Türkiye, specifies the maximum allowable total PBDE (PBDE28, 47, 100, 99, 154, 153) concentration as 140 ng/L. PBDE28 was not investigated in this study. The total concentration of the investigated PBDE compounds was determined to range from 0.96 to 74.5 ng/L. It was determined that the total concentration did not exceed the maximum limit value.

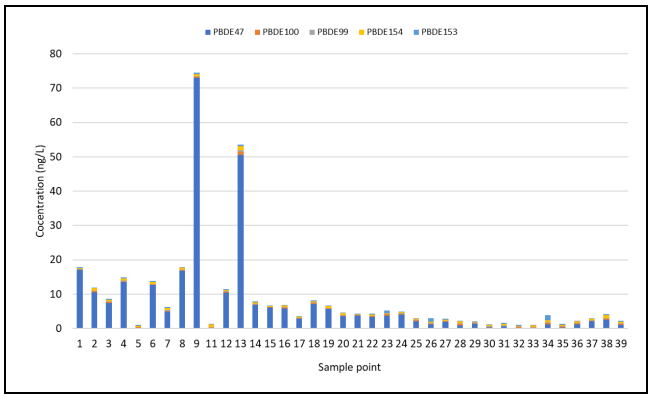


Figure 2. PBDE concentrations detected in surface waters.

Figure 3 shows the distributions of PBDE congeners in each sample. In water samples, the PBDE47 congener ranged from 9.60% to 98.05%, PBDE100 from 0.28% to 26.55%, PBDE99 from 0.31% to 19.85%, PBDE154 from 0.73% to 53.66%, and PBDE153 from 0.62% to 38.11%. According to Figure 3, PBDE47, PBDE154, and PBDE153 congeners were detected dominantly in 81.6%, in 13.16%, and 5.26%, of the water samples, respectively. The PBDE47 congener was detected in the highest concentrations in water samples. It was followed by PBDE153, PBDE154, PBDE100, and PBDE99 congeners. Penta-BDE contains PBDE47 (36.11%), PBDE99 (41.49%), PBDE100 (9.22%), PBDE153 (4.49%), and PBDE154 (3.18%). Octa-BDE contains PBDE153 (rate of 4.07%) and PBDE154 (rate of 0.51%) [3].

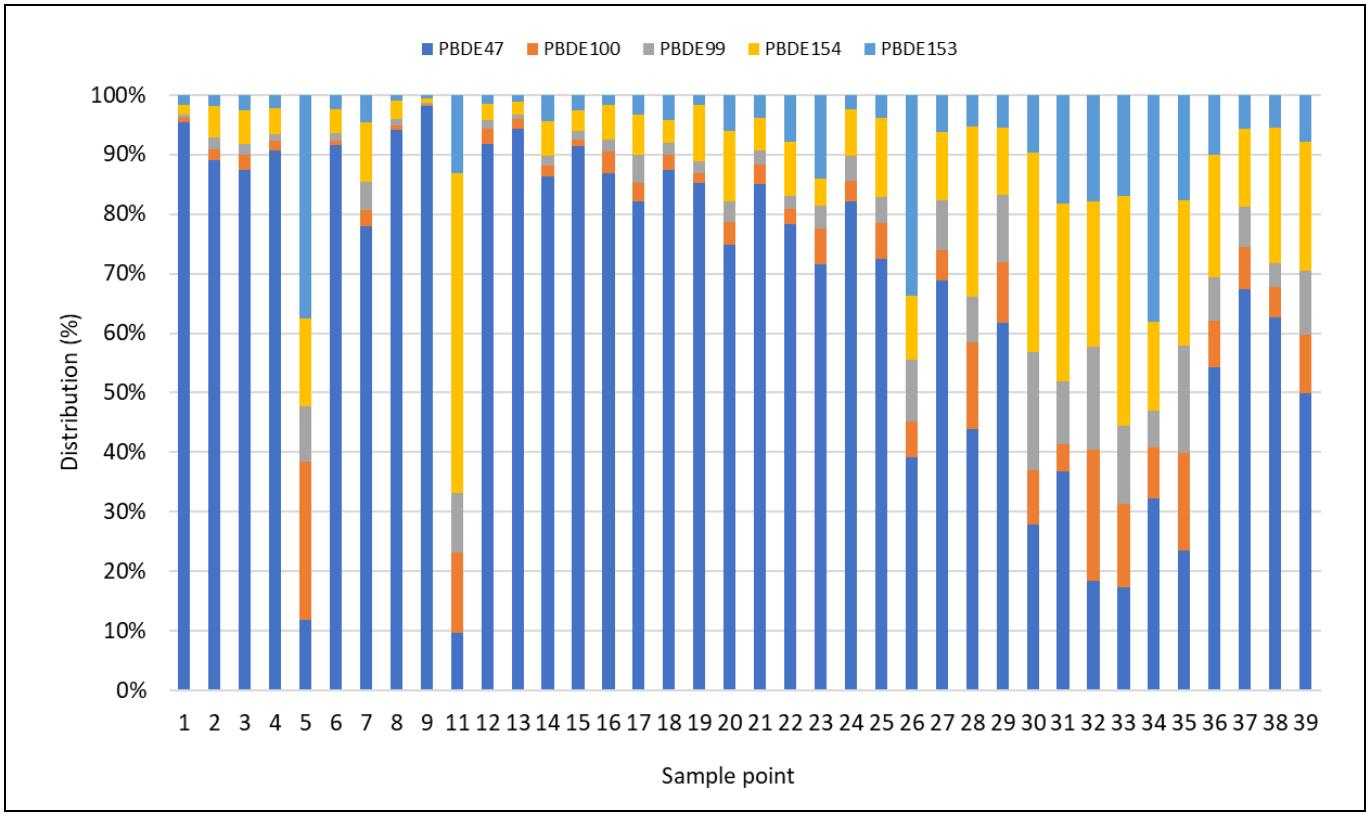


Figure 3. Distributions of PBDEs in water samples.

The high concentrations of PBDE47 in water samples were attributed to it being one of the main components of penta-BDE. PBDE99 was detected at low concentrations, however, it was also found in high amounts when part of the penta-BDE mixture. In literature studies, PBDE47 was detected more frequently than PBDE99 [31],[32]. This is thought to occur through atmospheric deposition, transport of contaminants, or debromination of the PBDE99 congener [32],[33]. PBDE47 was detected as the dominant congener in the water. Ge et al. [33] detected the PBDE47 congener predominantly in water samples. PBDE47 and PBDE99 congeners are the degradation products of PBDE209, and PBDE209 is still used in some countries. High brominated congeners may decompose over time and form low brominated congeners. Increasing temperatures in summer may cause the decomposition of congeners [34].

Total PBDE concentrations were higher at sample points 9 and 13, compared to other sample points. Pollutant sources around the sample areas included traffic, agriculture, residential areas, fishing, urban and domestic discharges, and industrial discharges.

In the sample points where concentrations were detected to be high, urban discharges flow into water resources, near agricultural residential areas. Olaniyan et al. [35] stated that the primary PBDE sources were industrial discharges, inadequate waste disposal, atmospheric pollution from local and imported e-waste, and surface runoff from residential and agricultural areas.

There are 9 organized industrial zones and 58 industrial areas in Konya. The sectors of machinery and equipment, metal products, food products, rubber and plastic, furniture, wood and cork products, leather products, automotive, and non-metallic mineral products are located in Konya province [36]. The Konya Closed Basin partially covers the provinces of Isparta, Niğde, Ankara, Aksaray, Nevşehir, and Karaman [23]. There are also important industrial sectors in these regions. PBDEs are applied as flame retardants in a wide variety of consumer products. Since PBDEs are additives that are not chemically bound to products, they can leak into the air. They can be adsorbed onto atmospheric particles and accumulate in water [37]. Some studies have reported that PBDEs are not treated in wastewater treatment plants but accumulate, especially in treatment sludge, and reach the receiving environments [38]. Industrial plant flue gases and wastewater are important sources of PBDEs. It has been reported that atmospheric PBDE concentrations in industrial areas are higher than in urban and residential areas [39]. Atmospheric transport and accumulation are the most important factors in the spread of PBDEs. In the Konya Closed Basin Measures Program summary report, it was stated that PBDE pressures in the basin originate from point-source industries such as machinery, weapons, automotive, metal, chrome plating, and the hunting industry sectors [23].

Table 5 shows the PBDE concentrations detected in surface waters in previous literature and in this study. The PBDE47 congener was detected in China at lower concentrations in 2017, 2018, 2019 and 2021 than in this study, while other congeners were detected at similar concentrations. PBDE100 and PBDE153 concentrations were found to be similar between this study and South Africa, but PBDE47 was detected at levels below the detection limit (dl) levels in South Africa.

Table 5. PBDEs detected in surface waters worldwide (ng/L)

Country	PBDE47	PBDE100	PBDE99	PBDE154	PBDE153	Reference
China	Rainy season 0.021-0.394 Dry season <dl-1.82	Rainy season 0.041-0.961 Dry season 0.017-2.56	Rainy season 0.077-1.22 Dry season <dl -3.32	Rainy season 0.002-0.205 Dry season <dl -0.048	Rainy season <dl -0.213 Dry season <dl -0.094	[3]
China	Rainy season 0.13-0.73 Dry season 0.05-4.5	Rainy season 0.21-0.54 Dry season 0.10-0.20	Rainy season 0.15-0.29 Dry season 0.03-0.12	Rainy season 0.15-0.88 Dry season <dl-0.09	Rainy season 0.17-0.28 Dry season <dl-0.09	[16]
China	0.38	0.01	0.08	0.05	<dl	[31]
China	0.96	0.0043	1.4	0.0069	2.8	[41]
South Africa	<dl	Rainy season <dl-0.082 Dry season <dl-0.0329	-	-	Rainy season <dl -0.131 Dry season <dl	[35]
Korea	<dl-6.15	<dl	<dl-2.46	<dl-0.21	<dl-10.4	[34]
Bulgaria	50-120	4	4-18	4-10	12-18	[42]
Nigeria	Rainy season 6.63,8.69 Dry season 4.64, 6.64	Rainy season 1.32, 4.14 Dry season 0.78, 1.44	Rainy season 4.52, 5.43 Dry season 3.57, 4.30	Rainy season 2.43, 3.81 Dry season 1.57, 1.27	Rainy season 4.03, 3.28 Dry season 2.68, 3.83	[17]
Pakistan	0.08-13.2	0.06-14.0	0.05-14.4	0.04-7.13	0.04-11.9	[43]
Czech Republic	27.44	-	0.963	0.835	0.316	[44]
France	0.046-0.205	0.013-0.029	0.054-0.181	0.009-0.028	0.014-0.038	[45]
Türkiye, Izmir	Dissolved phase Summer 0.04 Winter 0.0095 Particle phase Summer 0.034 Winter 0.011	Dissolved phase Summer 0.011 Winter 0.0034 Particle phase Summer 0.011 Winter 0.0038	Dissolved phase Summer 0.057 Winter 0.014 Particle phase Summer 0.053 Winter 0.016	Dissolved phase Summer 0.0054 Winter 0.0016 Particle phase Summer 0.0057 Winter 0.0018	Dissolved phase Summer 0.0082 Winter 0.0025 Particle phase Summer 0.0083 Winter 0.0027	[40]
Türkiye, Konya	0.13-73.1	0.07-0.92	0.09-0.40	0.16-1.17	0.13-1.46	In this study

<dl: below detection limit -: not analyzed.

Concentrations of PBDE99 and PBDE153 were found to be higher in Korea than the concentrations reported in this study. The concentration of the PBDE47 congener was also lower in Korea than in this study. The PBDE47 concentration was similar in Bulgaria and to that in this study, while other congeners were detected at higher concentrations in Bulgaria than in this study. The concentration of PBDE154 detected in Nigeria is similar to that of this study, while the concentration of PBDE47 is lower.

In Pakistan, PBDE congeners, except for the PBDE47 congener, were detected at higher concentrations than those reported in this study. When studies conducted in the Czech Republic and France were examined, PBDE47 congener was detected at low levels in France, while other congeners were found in similar concentrations. Studies on PBDE pollution in Türkiye have focused on the atmosphere. Cetin [40] and the Summary report of Konya Closed Basin measures program [23] investigated PBDEs in surface waters. The concentrations detected in the study conducted in 2006 in Izmir, Türkiye, were found to be lower than those found this study. Summary report of Konya closed basin measures program ΣPBDE (28, 47, 100, 99, 154, 153) results are given. In this study, the concentration of PBDE47 was generally higher than that reported in other studies. These comparisons have shown that surface waters in our country are contaminated with the pollutant congener PBDE47.

3.2 PBDEs in sediment samples

Figure 4 shows the concentrations of PBDEs detected in sediment samples. PBDE concentrations in sediment samples were determined as 0.01 to 0.098 µg/kg dry weight for PBDE47, 0.01 to 0.464 µg/kg dry weight for PBDE100, 0.01 to 0.032 µg/kg dry weight for PBDE99, 0.0003 to 0.161 µg/kg dry weight for PBDE154, and 0.004 to 0.041 µg/kg dry weight for PBDE153. Total PBDE concentrations in sediment samples were determined to be 0.01-0.64 µg/kg dry weight.

Figure 5 shows the distributions of PBDE congeners detected in each sediment sample. In sediment samples, the PBDE47 congener ranged from 1.73% to 68.60%, PBDE100 from 6.34% to 92.77%, PBDE99 from 1.30% to 34.73%, PBDE154 from 0.29% to 52.96%, and PBDE153 from 2.31% to 55.97%. When Figure 5 is examined, PBDE47, PBDE100, PBDE153, and PBDE154 congeners are detected dominantly in 21.4%, 39.3%, 35.7%, and 3.6% of sediment samples, respectively. The PBDE100 congener was detected in the highest concentrations in sediment samples. It was followed by PBDE154, PBDE47, PBDE153, and PBDE99 congeners.

The highest total PBDE concentration was detected at sample point 11. Urban discharge is released into the surface water source. The congener distribution profile in sediment samples differed from that in water samples.

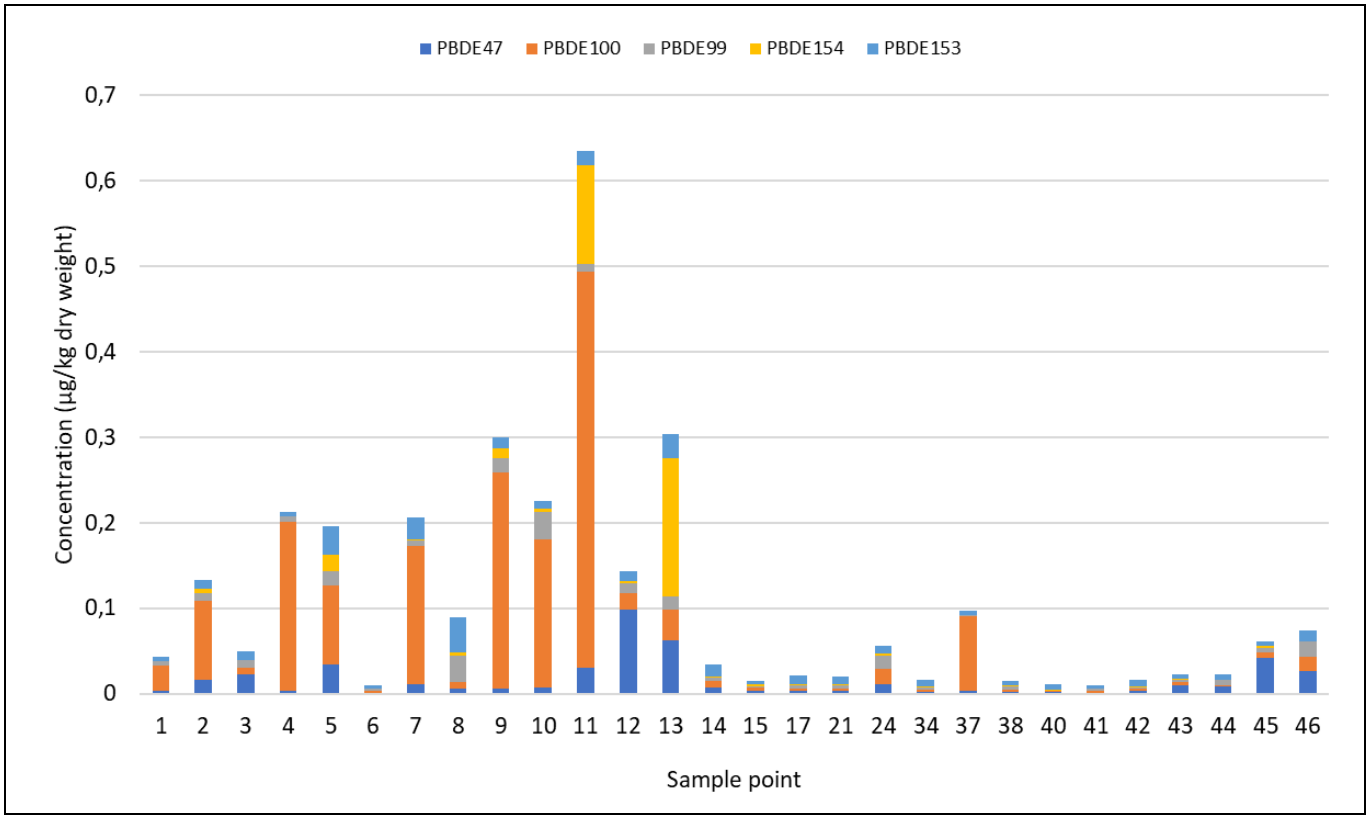


Figure 4. PBDE concentrations detected in sediments.

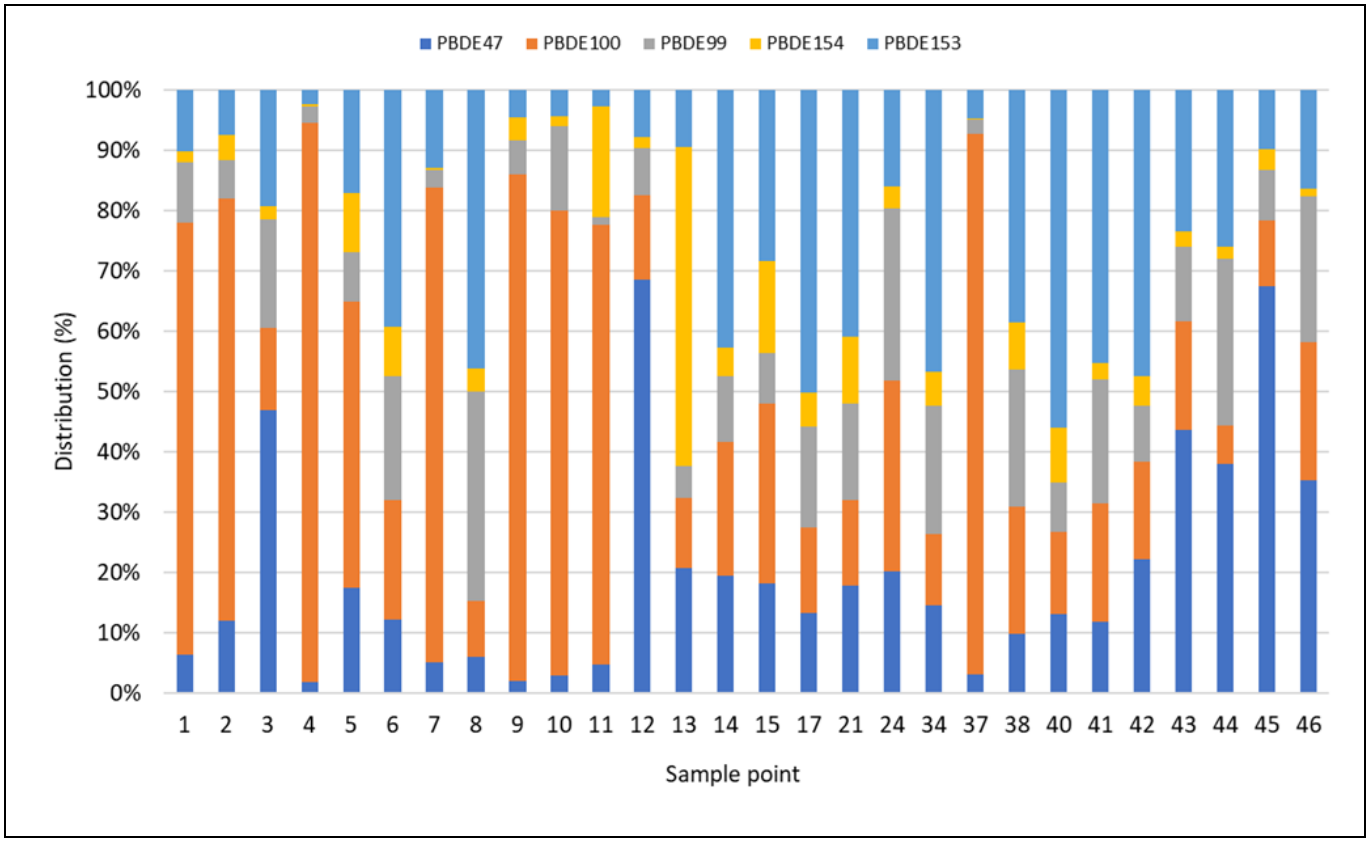


Figure 5. Distributions of PBDEs in sediment samples.

While PBDE47 congener was detected as the dominant congener in 81.6% of water samples, PBDE100 and PBDE153 were detected in 39.3% and 35.7% of sediment samples, respectively. PBDE47 was detected as a dominant congener in 21.4% of sediment samples. High molecular weight congeners are more likely to accumulate in sediment, while low molecular weight congeners tend to accumulate in water [46].

Oloruntoba et al. [17] reported that the amount of PBDEs detected in the sediment of artificial wetland ponds located in e-waste storage areas was approximately three times much as than that in water. They stated that PBDEs adsorb suspended solids and accumulate in the bottom sediment due to their hydrophobic character. Due to the slow flow of stream waters, PBDE congeners in water can be adsorbed onto suspended solids and then accumulate in the bottom sediment [32]. Lee et al. [34] reported that 95% of the PBDE in the sediment was PBDE209 in 2003, but, in contrast, 59%, 25%, and 6.6% of the PBDE in the sediment were PBDE209, PBDE47, and PBDE99 in 2013. They thought that lower-brominated congeners increased because of debromination of PBDE209 in the environment over time. Wei et al. [31] stated that PBDE47 was the main congener detected in water and sediment samples. Table 6 shows the concentrations of PBDEs detected in sediments worldwide.

The concentration of PBDE47 is lower than that found in Pakistan, Nigeria, Korea, South Africa and Hong Kong. The concentration of PBDE100 is similar to the concentrations detected in China, Korea, Hong Kong, France and lower than the concentrations detected in Nigeria and Pakistan. The concentration of PBDE99 was lower than the concentrations detected in Pakistan, Nigeria, Korea, Hong Kong, and was similar to the concentrations detected in China and France. The concentrations of PBDE154 and PBDE153 were also lower than the concentrations detected in Pakistan, Nigeria, Hong Kong, and were similar to the concentrations detected in China, South Africa, France. It is observed that the PBDEs in Pakistan Nigeria and Hong Kong are at higher concentrations than in other countries. It may be due to the lack of an effective waste management system. In China, the PBDE209 congener, which was not investigated in this study, is actively used frequently detected in various environmental settings [3]. With this comparison, it was observed that the concentrations detected in sediment samples were lower or similar to the world average. Both water and sediment samples were taken from 20 of the sampling points. Total PBDE concentrations in water and sediment samples taken from the same point are given in Figure 6. No correlation (R^2=0.09) was found between the total PBDE concentrations detected in water and sediment. Water and sediment samples were collected from streams. At some sampling points, the water flow rate was very high, while at others, it was quite slow. PBDEs need sufficient time to adsorb suspended particles before accumulating in sediment [17]. The low correlation between PBDE concentrations in water and sediment is thought to be primarily due to variations in flow rate.

The distribution rates of congeners in total PBDE concentrations detected in water and sediment samples are given in Figure 7. Figure 7 shows that 87% of the PBDE concentration detected in water samples is attributed to the PBDE47 congener, and the distribution of other congeners is between 2% and 5%. PBDE47 was detected predominantly in water samples. In sediment samples, the detected PBDE concentration is composed of the following: 56% PBDE100, 14% PBDE47, 11% PBDE153, 11% PBDE154, and 8% PBDE99. The PBDE100 congener was prevalently determined in sediment samples.

Table 6. PBDEs detected in sediment worldwide (ng/g dry weight)

Country	PBDE47	PBDE100	PBDE99	PBDE154	PBDE153	Reference
China	Rainy season 0.0139-0.190 Dry season <dl-0.0305	Rainy season 0.0135-0.168 Dry season 0.000666-0.082	Rainy season 0.0185-0.296 Dry season 0.000470-0.207	Rainy season <dl -0.00749 Dry season 0.000203-0.0128	Rainy season 0.00148-0.0245 Dry season 0.000032-0.0226	[3]
China	Rainy season 0.09-7.6 Dry season <dl-3.6	Rainy season 0.10-3.8 Dry season <dl-0.19	Rainy season 0.03-0.92 Dry season <dl-1.3	Rainy season 0.05-2.4 Dry season <dl-0.52	Rainy season 0.13-3.5 Dry season <dl-0.64	[16]
China	3.6	0.14	0.36	0.11	0.02	[31]
China	2.3	0.27	3.0	0.51	3.6	[41]
South Africa	Rainy season 0.00344-0.105 Dry season 0.000314-0.404	Rainy season <dl-0.712 Dry season 0.00023-0.218	-	-	Rainy season 0.000805-0.411 Dry season 0.000077-0.104	[35]
Korea	<dl-21.0	<dl-0.26	<dl-8.01	<dl	<dl	[34]
Nigeria	Rainy season 7.91-14.9 Dry season 13.6-8.48	Rainy season 14.71-12.5 Dry season 6.42-14.1	Rainy season 14.1-18.6 Dry season 11.2-15.3	Rainy season 2.23-6.42 Dry season 5.35-3.04	Rainy season 14.4-23.2 Dry season 9.28-16.4	[17]
Pakistan	0.06-15.9	0.02-16.8	0.08-24.2	0.03-8.55	0.02-14.3	[43]
France	0.19-0.78	0.09-0.540	0.34-0.299	0.05-0.1	0.07-0.13	[45]
Hong Kong	0.36-2.55	0.01-0.23	0.3-8.46	0.06-2.45	0.23-5.36	[47]
Türkiye	0.01-0.098	0.01-0.464	0.01-0.32	0.0003-0.161	0.004-0.41	In this study

<dl: below detection limit -: not analyzed.

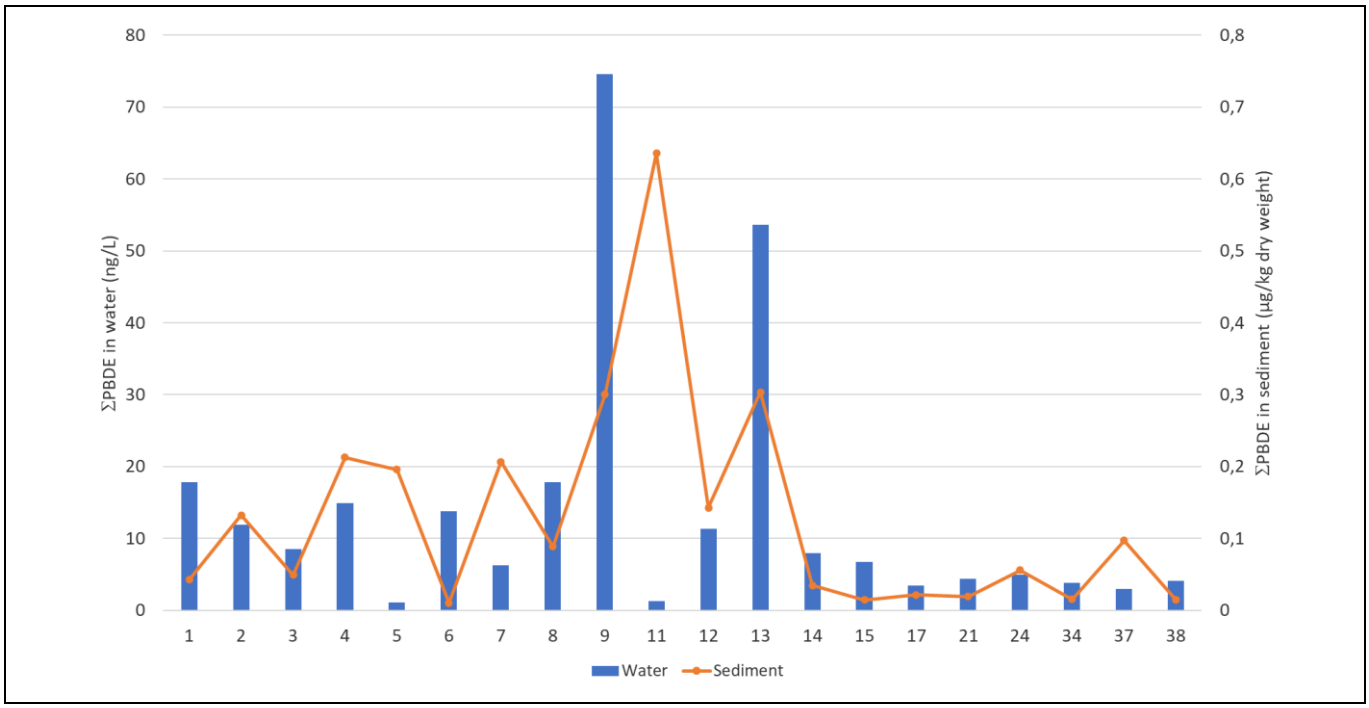


Figure 6. ΣPBDE in water and sediment samples.

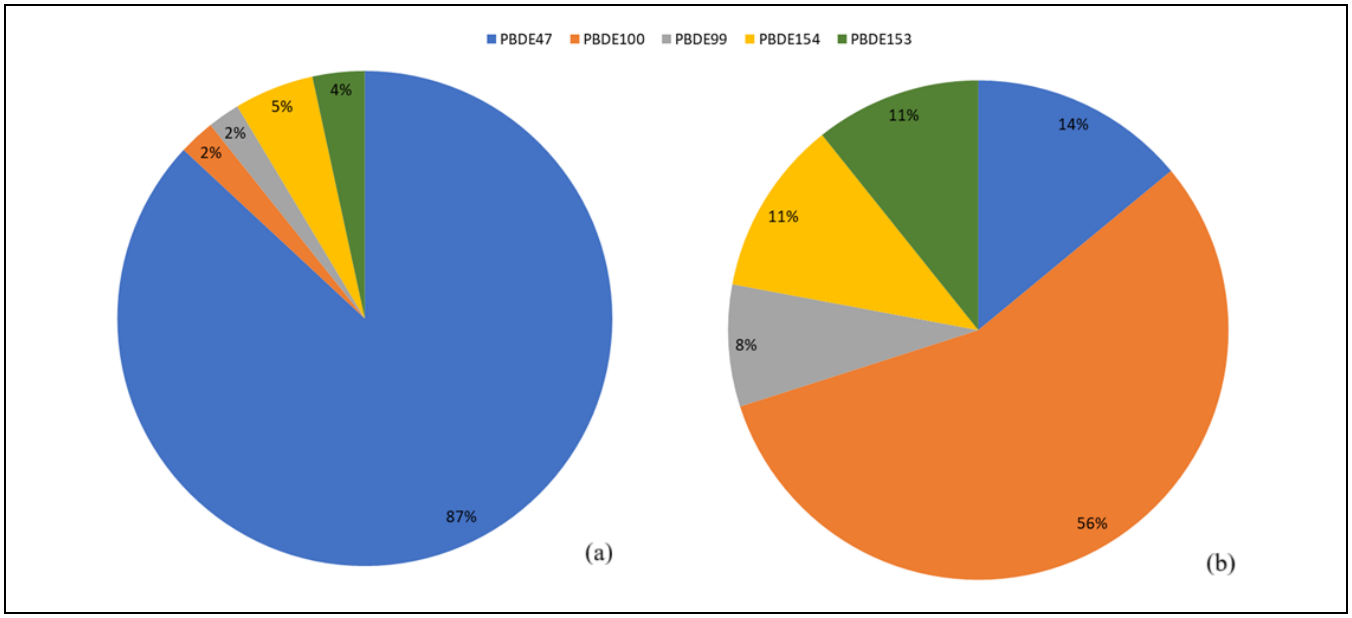


Figure 7. Distributions of total PBDE compounds detected in Konya closed basin. (a): Water. (b): Sediment.

3.3 Risk assessment

The calculated RQs are given in Table 7 and Table 8. In Table 7, PBDE47 congener showed a high risk for all trophic levels in 5.26% of the samples, and a moderate risk for fish in 55.3%, for *Daphnia magna* in 60.5%, and for algae in 52.7% of the samples. PBDE100 showed moderate risk for fish and *Daphnia magna* in 2.63% of the samples, while the remaining samples exhibited either no risk or low risk. PBDE99 showed low risk for fish and *Daphnia magna* in all samples. For algae, the analysis showed a low risk in 21% of the samples, while no risk was observed in the other samples. In Table 8, PBDE154 showed high risk in 7.9% of the samples for fish and 5.3% of the samples for *Daphnia magna*, and moderate risk in the remaining samples. PBDE153 caused high risk in 7.9% of the samples for fish and *Daphnia magna*, and moderate risk in the other samples. PBDE153 and PBDE154 showed moderate risk in 7.9% of the samples for algae, while no risk was detected in the other samples. PBDE47, PBDE154, and PBDE153 posed a high risk to aquatic organisms. Only the PBDE99 congener posed no significant risk. Moderate risk was observed in at least one sample point and at least one trophic level for all other congeners. In the study, the aquatic organisms least affected by PBDEs were algae.

Table 7. RQ of water samples for PBDE47, PBDE100, PBDE99 (No risk; Low risk; Medium risk; High risk)

Sample point	PBDE47			PBDE100			PBDE99		
	Fish	*Daphnia magna*	Algae	Fish	*Daphnia magna*	Algae	Fish	*Daphnia magna*	Algae
1	0.8115	0.9468	0.7101	0.0265	0.0265	0.0044	0.0249	0.0249	0.0042
2	0.5058	0.5901	0.4426	0.0531	0.0531	0.0088	0.0581	0.0581	0.0097
3	0.3560	0.4153	0.3115	0.0531	0.0531	0.0088	0.0415	0.0415	0.0069
4	0.6425	0.7496	0.5622	0.0619	0.0619	0.0103	0.0415	0.0415	0.0069
5	0.0060	0.0070	0.0052	0.0707	0.0707	0.0118	0.0249	0.0249	0.0042
6	0.6029	0.7034	0.5276	0.0265	0.0265	0.0044	0.0415	0.0415	0.0069
7	0.2325	0.2713	0.2035	0.0442	0.0442	0.0074	0.0747	0.0747	0.0125
8	0.7971	0.9300	0.6975	0.0354	0.0354	0.0059	0.0498	0.0498	0.0083
9	3.4810	4.0611	3.0458	0.0531	0.0531	0.0088	0.0581	0.0581	0.0097
11	0.0060	0.0070	0.0052	0.0442	0.0442	0.0074	0.0332	0.0332	0.0055
12	0.4975	0.5804	0.4353	0.0707	0.0707	0.0118	0.0415	0.0415	0.0069
13	2.4069	2.8081	2.1061	0.2299	0.2299	0.0383	0.0996	0.0996	0.0166
14	0.3260	0.3804	0.2853	0.0354	0.0354	0.0059	0.0332	0.0332	0.0055
15	0.2925	0.3412	0.2559	0.0177	0.0177	0.0029	0.0249	0.0249	0.0042
16	0.2793	0.3258	0.2444	0.0619	0.0619	0.0103	0.0332	0.0332	0.0055
17	0.1355	0.1580	0.1185	0.0265	0.0265	0.0044	0.0415	0.0415	0.0069
18	0.3404	0.3972	0.2979	0.0531	0.0531	0.0088	0.0415	0.0415	0.0069
19	0.2697	0.3147	0.2360	0.0265	0.0265	0.0044	0.0332	0.0332	0.0055
20	0.1666	0.1944	0.1458	0.0442	0.0442	0.0074	0.0415	0.0415	0.0069
21	0.1762	0.2056	0.1542	0.0354	0.0354	0.0059	0.0249	0.0249	0.0042
22	0.1618	0.1888	0.1416	0.0265	0.0265	0.0044	0.0249	0.0249	0.0042
23	0.1798	0.2098	0.1573	0.0796	0.0796	0.0133	0.0498	0.0498	0.0083
24	0.1918	0.2238	0.1678	0.0442	0.0442	0.0074	0.0498	0.0498	0.0083
25	0.1019	0.1189	0.0892	0.0442	0.0442	0.0074	0.0332	0.0332	0.0055
26	0.0539	0.0629	0.0472	0.0442	0.0442	0.0074	0.0747	0.0747	0.0125
27	0.0899	0.1049	0.0787	0.0354	0.0354	0.0059	0.0581	0.0581	0.0097
28	0.0455	0.0531	0.0399	0.0796	0.0796	0.0133	0.0415	0.0415	0.0069
29	0.0611	0.0713	0.0535	0.0531	0.0531	0.0088	0.0581	0.0581	0.0097
30	0.0156	0.0182	0.0136	0.0265	0.0265	0.0044	0.0581	0.0581	0.0097
31	0.0276	0.0322	0.0241	0.0177	0.0177	0.0029	0.0415	0.0415	0.0069
32	0.0084	0.0098	0.0073	0.0531	0.0531	0.0088	0.0415	0.0415	0.0069
33	0.0084	0.0098	0.0073	0.0354	0.0354	0.0059	0.0332	0.0332	0.0055
34	0.0588	0.0687	0.0515	0.0804	0.0804	0.0134	0.0604	0.0604	0.0101
35	0.0144	0.0168	0.0126	0.0531	0.0531	0.0088	0.0581	0.0581	0.0097
36	0.0587	0.0685	0.0514	0.0442	0.0442	0.0074	0.0415	0.0415	0.0069
37	0.0959	0.1119	0.0839	0.0531	0.0531	0.0088	0.0498	0.0498	0.0083
38	0.1235	0.1440	0.1080	0.0531	0.0531	0.0088	0.0415	0.0415	0.0069
39	0.0515	0.0601	0.0451	0.0531	0.0531	0.0088	0.0581	0.0581	0.0097

Table 8. RQ of water samples for PBDE154, PBDE153 (No risk; Low risk; Medium risk; High risk)

Sample point	PBDE154			PBDE153		
	Fish	*Daphnia magna*	Algae	Fish	*Daphnia magna*	Algae
1	0.4531	0.4342	0.0447	0.4149	0.3976	0.0409
2	0.9061	0.8684	0.0893	0.3319	0.3181	0.0327
3	0.6796	0.6513	0.0670	0.3319	0.3181	0.0327
4	0.9061	0.8684	0.0893	0.4979	0.4771	0.0491
5	0.2265	0.2171	0.0223	0.5808	0.5566	0.0573
6	0.7929	0.7598	0.0782	0.4979	0.4771	0.0491
7	0.9061	0.8684	0.0893	0.4149	0.3976	0.0409
8	0.7929	0.7598	0.0782	0.2489	0.2386	0.0245
9	0.7929	0.7598	0.0782	0.6638	0.6361	0.0654
11	1.0194	0.9769	0.1005	0.2489	0.2386	0.0245
12	0.4531	0.4342	0.0447	0.2489	0.2386	0.0245
13	1.6990	1.6282	0.1675	0.8298	0.7952	0.0818
14	0.6796	0.6513	0.0670	0.4979	0.4771	0.0491
15	0.3398	0.3256	0.0335	0.2489	0.2386	0.0245
16	0.5663	0.5427	0.0558	0.1660	0.1590	0.0164
17	0.3398	0.3256	0.0335	0.1660	0.1590	0.0164
18	0.4531	0.4342	0.0447	0.4979	0.4771	0.0491
19	0.9061	0.8684	0.0893	0.1660	0.1590	0.0164
20	0.7929	0.7598	0.0782	0.4149	0.3976	0.0409
21	0.3398	0.3256	0.0335	0.2489	0.2386	0.0245
22	0.5663	0.5427	0.0558	0.4979	0.4771	0.0491
23	0.3398	0.3256	0.0335	1.0787	1.0337	0.1063
24	0.5663	0.5427	0.0558	0.1660	0.1590	0.0164
25	0.5663	0.5427	0.0558	0.1660	0.1590	0.0164
26	0.4531	0.4342	0.0447	1.4106	1.3518	0.1390
27	0.4531	0.4342	0.0447	0.2489	0.2386	0.0245
28	0.9061	0.8684	0.0893	0.1660	0.1590	0.0164
29	0.3398	0.3256	0.0335	0.1660	0.1590	0.0164
30	0.5663	0.5427	0.0558	0.1660	0.1590	0.0164
31	0.6796	0.6513	0.0670	0.4149	0.3976	0.0409
32	0.3398	0.3256	0.0335	0.2489	0.2386	0.0245
33	0.5663	0.5427	0.0558	0.2489	0.2386	0.0245
34	0.8237	0.7894	0.0812	2.1121	2.0241	0.2082
35	0.4531	0.4342	0.0447	0.3319	0.3181	0.0327
36	0.6796	0.6513	0.0670	0.3319	0.3181	0.0327
37	0.5663	0.5427	0.0558	0.2489	0.2386	0.0245
38	1.3592	1.3026	0.1340	0.3319	0.3181	0.0327
39	0.6796	0.6513	0.0670	0.2489	0.2386	0.0245

This result was also observed in the studies conducted by Xiong et al. [15],[48]. Liu et al. [30] determined low risk for algae and moderate risk for fish and *Daphnia magna* in their risk assessment of PBDEs using the RQ method and emphasized that more attention should be paid to the aquatic environment. Xiong et al. [15] stated that RQ values for fish, *Daphnia magna*, and algae were less than 1 at all sampling points, and no ecotoxicological risk was expected. Li et al. [49] determined that the RQ value was <0.1 in surface waters in China and evaluated it as a low ecological risk. In this study, the ecotoxicological risk of PBDEs has been assessed. Considering that other pollutants are also present in aquatic environments along with PBDEs, the actual risk is likely higher than what has been identified.

4 Conclusion

In this study, PBDE47, PBDE100, PBDE99, PBDE154, and PBDE153 congeners were investigated in water and sediment samples. Samples were collected from surface water in the Konya Closed Basin. PBDEs were detected in the range of 0.13-73.1 ng/L for PBDE47, 0.08-0.92 ng/L for PBDE100, 0.09-0.40 ng/L for PBDE99, 0.16-1.17 ng/L for PBDE154, and 0.12-1.46 ng/L for PBDE153 in water samples. Total PBDE concentration ranged from 0.96 to 74.5 ng/L in water samples. PBDEs in sediment samples were found to be 0.01-0.098 µg/kg dry weight for PBDE47, 0.01-0.464 µg/kg dry weight for PBDE100, 0.01-0.032 µg/kg dry weight g for PBDE99, 0.0003-0.161 µg/kg dry weight for PBDE154, and 0.004-0.041 µg/kg dry weight for PBDE153. Total PBDE concentrations were determined to be 0.01-0.64 µg/kg dry weight in sediment samples. While the PBDE47 congener was dominant in water samples, however, the PBDE100, PBDE153, and PBDE47 congeners were dominant in sediment samples. The dominance of PBDE47 congener suggests the presence of the commercial penta-PBDE mixture. When the obtained results are compared with other studies conducted worldwide, it has been determined that the surface water resources in the Konya Closed Basin are contaminated with PBDEs. The identification of high pollution levels in water resources receiving urban and industrial discharges has emphasized the need to focus on industrial areas. The risk assessment results showed that PBDE47, PBDE154, and PBDE153 congeners were detected to present a high risk to fish, *Daphnia magna* and algae at some sample points. This situation has demonstrated that there is PBDE contamination in surface waters at levels that can affect aquatic life. The risk assessment was conducted individually for each congener. Congeners and other environmental pollutants are present in water, and when their toxic effects on living beings are combined, it may result in more serious risks.

There is no information on whether PBDE is used in our country. However, detectable levels of PBDE have been detected in different environmental environments media [50] Products containing PBDE were imported before becoming a party to the Stockholm Convention. The regulation on persistent organic pollutants is in force in our country. The list of substances subject to restriction is in Annex 2 of the regulation. PBDEs are included in this list. The production, use and marketing of products containing PBDEs are permitted in some exceptional cases. The use of items containing PBDEs, which were in use before the regulation came into force, is permitted. Electronic devices, vehicles, etc., especially those containing PBDE, should be disposed of appropriately after their useful life ends. During the processing of these wastes, parts containing PBDE must be separated and stored appropriately. The import of second-hand electronic products into our country is prohibited. However, restricting the second-hand electronics market within the country would prevent the use of those that have reached the end of their life. Raising public awareness and encouraging the collection of electronic waste are crucial. PBDEs are micropollutants with high log Kow values (PBDE47: 6.55, PBDE99: 7.13, PBDE100: 6.86, PBDE153: 7.62, PBDE154: 7.39; [14]). Therefore, they can show high accumulations in seafood, agricultural products, terrestrial organisms, and humans over time. The surface water resources examined in the study are used for irrigation purposes and may cause PBDEs to reach the food chain.

In the study we conducted in the Konya Closed Basin, it was determined that surface water resources were contaminated with PBDEs and posed an ecological risk. The sampling points in the study are adequate and representative. However, only a single sampling was conducted may limit the generalizability of the results. It is recommended that future studies include more sampling efforts. To fully determine the extent and source of pollution, detailed research is also required in the water, atmosphere, soil and products grown in the region.

5 Author contribution statements

In this study, Arzu Ulvi, Senar Aydin and Mehmet Emin Aydin contributed to the determination of the subject of the article, design, literature review, evaluation of the results and proofreading.

6 Ethics committee approval and conflict of interest statement

"There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared".

"There are no conflicts of interest with any individual/entity in the prepared article".

7 Reference

[1] Turan F, Ulku G. "Monitoring water quality parameters and pollution discharge loads of Gökpınar and Çürüksu Creeks, Denizli, Türkiye". *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 19(3), 133-144, 2013.

[2] Gültekin F, Temizel EH. "Water quality of atasu dam basin (Maçka-Trabzon)". *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 31(2), 288-301, 2025.

[3] Pei J, Yao H, Wang H, Li H, Lu S, Zhang X, Xiang X. "Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in water, surface sediment, and suspended particulate matter from the Yellow River, China: Levels, spatial and seasonal distribution, and source contribution". *Marine Pollution Bulletin,* 129(1), 106-113, 2018.

[4] Lan Y, Gao X, Xu H, Li M. "20 years of polybrominated diphenyl ethers on toxicity assessments". *Water Research*, 249, 121007, 2024.

[5] Vuong A M, Yolton K, Dietrich KN, Braun JM, Lanphear BP, Chen A. "Exposure to polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and child behavior: Current findings and future directions". *Hormones and Behavior,* 101, 94-104, 2018.

[6] Karakas F, Aksoy A, Imamoglu I. "Development of a fate and transport model for biodegradation of PBDE congeners in sediments". *Environmental Pollution*, 266, 115116, 2020.

[7] Motamedi M, Yerushalmi L, Haghighat F, Chen Z. "A critical review of water contamination by polybrominated diphenyl ethers (PBDE) and main degradation techniques". *Journal of Environmental Chemical Engineering,* 10(4), 108196, 2022.
[8] Moon HB, Kannan K, Lee SJ, Choi M. "Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in sediment and bivalves from Korean coastal waters". *Chemosphere,* 66(2), 243-251, 2007.
[9] Da C, Wang R, Xia L, Huang Q, Cai J, Cai F, Gao C. "Sediment records of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in Yangtze River Delta of Yangtze River in China". *Marine Pollution Bulletin*, 160, 111714, 2020.
[10] Li H, Wang Z, He J, Zhang N, Mao X, Ma J, Gao H, Yang Z, Ma H. "Deca-BDE emissions, validation, and environmental fate in China". *Journal of Hazardous Materials,* 459, 132223, 2023.
[11] Yang C, Jiang Y, Zhao W, Peng J, Liu Y, Lin X, Zhang J. "Characterization and distribution of polybrominated diphenyl ethers in shellfish in Shenzhen coastal waters and assessment of human health risks". *Marine Pollution Bulletin*, 191, 114957, 2023.
[12] Zhang Y, Xi B, Tan W. "Release, transformation, and risk factors of polybrominated diphenyl ethers from landfills to the surrounding environments: A review". *Environment International,* 157, 106780, 2021.
[13] Chen Y, Li J, Tan Q. "Trends of production, consumption and environmental emissions of Decabromodiphenyl ether in mainland China". *Environmental Pollution*, 260, 114022, 2020.
[14] Pan Y, Tsang DCW, Wang Y, Li Y, Yang X. "The photodegradation of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in various environmental matrices: Kinetics and mechanisms". *Chemical Engineering Journal,* 297, 74-96, 2016.
[15] Xiong J, Li G, An T, Zhang C, Wei C. "Emission patterns and risk assessment of polybrominated diphenyl ethers and bromophenols in water and sediments from the Beijiang River, South China". *Environmental Pollution*, 219, 596-603, 2016.
[16] Sun H, Giesy JP, Jin X, Wang J. "Tiered probabilistic assessment of organohalogen compounds in the Han River and Danjiangkou Reservoir, central China". *Science of The Total Environment*, 586, 163-173, 2017.
[17] Oloruntoba K, Sindiku O, Osibanjo O, Weber R. "Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) concentrations in soil, sediment and water samples around electronic wastes dumpsites in Lagos, Nigeria". *Emerging Contaminants*, 8, 206-215, 2022.
[18] Zota A, Mitro SD, Robinson JF, Hamilton EG, Park JS, Parry E, Zoeller RT, Woodruff, TJ. "Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and hydroxylated PBDE metabolites (OH-PBDEs) in maternal and fetal tissues, and associations with fetal cytochrome P450 gene expression". *Environment International*, 112, 269-278, 2018.
[19] Ozcan S, Tor A, Aydin ME. "Levels of Organohalogenated Pollutants in Human Milk Samples from Konya City, Turkey". *CLEAN- Soil, Air, Water*, 39(10), 978-983, 2011.
[20] Tongue ADW, Reynolds SJ, Fernie KJ, Harrad S. "Flame retardant concentrations and profiles in wild birds associated with landfill: A critical review". *Environmental Pollution,* 248, 646-658, 2019.
[21] Kelly BC, Ikonomou MG, Blair JD, Morin AE, Gobas FAPC. "Food web-specific biomagnification of persistent organic pollutants". *Science,* 317, 236-9, 2007.
[22] Marquès M, Nadal M, Domingo JL. "Human exposure to polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) through the diet: An update of the scientific literature". *Food and Chemical Toxicology*, 167, 113322, 2022.
[23] Republic of Türkiye Ministry of Agriculture And Forestry, General Directorate of Water Management, "Konya Closed Basin Management Plan". https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Sayfalar/Detay.aspx?SayfaId=49 (20.01.2025).
[24] Ministry of Agriculture and Forestry "Konya Basin Drought Management Plan Update Project, Konya Basin Drought Management Plan Final Report". https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Sayfalar/Detay.aspx?SayfaId=61 (20.01.2025).
[25] Keith LH, Crummett W, Deegan J, Libby RA, Taylor JK, Wentler G. "Principles of environmental analysis". *Analytical Chemistry,* 55, 2210-2218, 1983.
[26] US Environmental Protection Agency. "QA/QC Guidance for Sampling and Analysis of Sediments, Water, and Tissues for Dredged Material Analysis". Washington, D.C, EPA 823-B-95-001, 1995.
[27] Emmanuel E, Perrodin Y, Keck G, Blanchard J, M, Vermande P. "Ecotoxicological risk assessment of hospital wastewater: a proposed framework for raw effluents discharging into urban sewer network". *Journal of Hazardous Materials,* 117(1), 1-11, 2005.
[28] Gu W, Li X, Du M, Ren Z, Li Q, Li Y. "Identification and regulation of ecotoxicity of polychlorinated naphthalenes to aquatic food Chain (green algae-Daphnia magna-fish)". *Aquatic Toxicology,* 233, 105774, 2021.
[29] Aydin S, Aydin ME, Ulvi A, Kilic H. "Antibiotics in hospital effluents: occurrence, contribution to urban wastewater, removal in a wastewater treatment plant, and environmental risk assessment". *Environmental Science and Pollution Research*, 26(1), 544-558, 2018.
[30] Liu J, Lu G, Zhang F, Nkoom M, Yan Z, Wu D. "Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in a Large, Highly Polluted Freshwater Lake, China: Occurrence, Fate, and Risk Assessment". *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(7), 1529, 2018.
[31] Wei L, Tadesse AW, Wang J. "Organohalogenated Contaminants (OHCs) in Surface Sediments and Water of East Dongting Lake and Hong Lake, China". *Archives of Environmental Contamination and Toxicology,* 76(2), 157-170, 2019.
[32] Moon HB, Choi M, Yu J, Jung RH, Choi HG. "Contamination and potential sources of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in water and sediment from the artificial Lake Shihwa, Korea". *Chemosphere*, 88, 837-843, 2012.
[33] Ge J, Liu M, Yun X, Yang Y, Zhang M, Li QX, Wang J. "Occurrence, distribution and seasonal variations of polychlorinated biphenyls and polybrominated diphenyl ethers in surface waters of the East Lake, China". *Chemosphere*, 103, 256-262, 2014.
[34] Lee HK, Lee S, Lim JE, Moon HB. "Legacy and novel flame retardants in water and sediment from highly industrialized bays of Korea: Occurrence, source tracking, decadal time trend, and ecological risks". *Marine Pollution Bulletin,* 160, 111639, 2020.

[35] Olaniyan OO, Adeniji AO, Okoh AI, Okoh OO. "Occurrence and risk assessment of polybrominated diphenyl ethers in surficial water and sediment from Buffalo River estuary, South Africa". *Marine Pollution Bulletin,* 209, Part A, 117176, 2024.

[36] Republic of Turkey Ministry of Industry and Technology, "Konya Provincial Industrial Status Report". https://www.konyadayatirim.gov.tr/assets/upload/dosyalar/konya-il-sanayi-durum-raporu.pdf (20.01.2025).

[37] Deng D, Chen H, Tam NFY. "Temporal and spatial contamination of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in wastewater treatment plants in Hong Kong". *Science of The Total Environment*, 502, 133-142, 2015.

[38] Kim M, Han J. "Treatment techniques for removal of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) from real wastewater: Limitations, challenges, and future research directions". *Journal of Water Process Engineering*, 63, 105463, 2024.

[39] Cetin B, Odabasi M, "Atmospheric concentrations and phase partitioning of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in Izmir, Turkey". *Chemosphere,* 71, 1067-1078, 2008.

[40] Cetin, B. The Distribution and Cycling of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in Environmental Compartments at Izmir Area. Doctoral Thesis, Dokuz Eylül University, İzmir, Türkiye, 2006.

[41] Ling S, Lu C, Peng C, Zhang W, Lin K, Zhou B, "Characteristics of legacy and novel brominated flame retardants in water and sediment surrounding two e-waste dismantling regions in Taizhou, eastern China". *Science of The Total Environment*, 794, 148744, 2021.

[42] Gecheva G, Yancheva V, Velcheva I, Georgieva E, Stoyanova, S, Arnaudova D, Stefanova V, Georgieva D, Genina V, Todorova B, Mollov I. "Integrated monitoring with moss-bag and mussel transplants in reservoirs". *Water*, 12(6), 1800 2020.

[43] Mahmood A, Malik RN, Li J, Zhang G. "Distribution, congener profile, and risk of polybrominated diphenyl ethers and dechlorane plus in water and sediment from two tributaries of the chenab river, Pakistan". *Archives of Environmental Contamination and Toxicology,* 68(1), 83-91, 2015.

[44] Jarova K, Koleckarova A, Kralova Z, Vavrova M. "Environmental assessment of PBDEs contamination in the Svitava River, Czech Republic" *Neuroendocrinology Letters,* 37(1), 45-52, 2016.

[45] Labadie P, Tlili K, Alliot F, Bourges C, Desportes A, Chevreuil M. "Development of analytical procedures for trace-level determination of polybrominated diphenyl ethers and tetrabromobisphenol a in river water and sediment". *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 396(2), 865-875, 2009.

[46] Li WL, Ma WL, Jia HL, Hong WJ, Moon HB, Nakata H, Minh NH, Sinha RK, Chi KH, Kannan K, Sverko E, Li YF. "Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in Surface Soils across Five Asian Countries: Levels, Spatial Distribution, and Source Contribution". *Environmental Science & Technology,* 50(23), 12779-12788, 2016.

[47] Liu Y, Zheng GJ, Yu H, Martin M, Richardson BJ, Lam MHW, Lam PKS, "Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in sediments and mussel tissues from Hong Kong marine waters". *Marine Pollution Bulletin*, 50(11), 1173-1184, 2005.

[48] Xiong J, An, T, Zhang C, Li G. "Pollution profiles and risk assessment of PBDEs and phenolic brominated flame retardants in water environments within a typical electronic waste dismantling region". *Environmental Geochemistry and Health,* 37(3), 457-473, 2015.

[49] Li B, Shi J, Jiawei Z, Tao H, Hui G, Zhang M, Xu Z, Xiao R. "Occurrence and ecological risk assessment of 2,2',4,4'-tetrabromodiphenyl ether and decabromodiphenyl ether in surface waters across China". *Chemosphere*, 312(1), 137215, 2023.

[50] Republic of Turkey Ministry of Environment and Urbanization, "National Implementation Plan, Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants". Ankara, Türkiye, GF/TUR/03/008, 2014.

Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 31(7), 1321-1326, 2025

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Reduction of nitrate by biogenic sulfide in denitrifying membrane-sulfidogenic up flow column reactor system

Yeraltı sularından nitrat ve sülfatın denitrifikasyon membran-sülfidojenik yukarı akışlı kolon sıralı reaktör sisteminde giderimi

Amine Yücel[1], *Tülay Yılmaz*[2*], *Deniz Uçar*[3]

[1]Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Harran University, Şanlıurfa, Türkiye.
amineycll@gmail.com

[2]Department of Bioengineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Bursa Technical University, Bursa, Türkiye.
tulayylmaz@outlook.com

[3]Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Bursa Technical Univ., Bursa, Türkiye.
deniz.ucar@btu.edu.tr

Received/Geliş Tarihi: 24.12.2024 Revision/Düzeltme Tarihi: 06.05.2025 doi: 10.5505/pajes.2025.83404
Accepted/Kabul Tarihi: 16.05.2025 Research Article/Araştırma Makalesi

Abstract

Sulfur- or thiosulfate- based autotrophic denitrification presents an effective and economical solution for nitrate removal from wastewater or groundwater with low concentrations of organic matter. However, the substantial production of sulfate can limit its wider application, particularly in groundwater that already exhibits high sulfate concentrations. This study evaluated the performance of a sequential system engineered for the effective removal of both nitrate and sulfate from groundwater. The system integrates autotrophic denitrification, which occurs within a membrane bioreactor (MBR), with ethanol-based sulfate reduction. A key design feature of this system is the utilization of sulfide, generated in a sulfidogenic column bioreactor, as the primary electron source for the denitrification process. The system was operated using synthetic groundwater containing nitrate at concentrations of 25 and 100 mg N/L in successive phases. While the system achieved near-complete nitrate removal across both influent nitrate concentrations, it demonstrated poor sulfate reduction performance. The original design intended for the sulfide produced from sulfate reduction in the column bioreactor to be used solely as an electron source for nitrate removal in the MBR. However, the observed low sulfate removal efficiency resulted in the carryover of organic matter from the sulfidogenic column bioreactor to the MBR, thereby fostering mixotrophic denitrification conditions. The study underscores that optimizing sulfur-based combined systems is crucial for achieving the simultaneous and efficient removal of both nitrate and sulfate.

Keywords: Sulfide-based denitrification, Sulfate reduction, Sequential system, Membrane bioreactor.

Öz

Kükürt ya da tiyosülfat bazlı ototrofik denitrifikasyon prosesleri, düşük organik madde konsantrasyonlarına sahip atıksu veya yeraltı suyundan nitrat giderimi için etkili ve ekonomik bir çözüm sunmaktadır. Ancak, yüksek sülfat üretimleri, özellikle halihazırda yüksek sülfat konsantrasyonlarına sahip atıksu veya yeraltı sularında, bu yöntemin yaygınlaşmasını sınırlayabilmektedir. Bu çalışmada, yeraltı suyundan hem nitratın hem de sülfatın giderimi için tasarlanmış ardışık iki farklı prosesten oluşan kombine bir sistemin performansı değerlendirilmiştir. Sistemde, bir membran biyoreaktörde (MBR) gerçekleşen ototrofik denitrifikasyon, yukarı akışlı kolon bir reaktörde gerçekleşen etanol bazlı sülfat indirgeme prosesiyle birleştirilmiştir. Sistemde, yukarı akışlı sülfidojenik kolon biyoreaktörde üretilen sülfürün denitrifikasyon işlemi için birincil elektron kaynağı olarak kullanılması amaçlanmıştır. Sistem, 25 ve 100 mg N/L nitrat içeren sentetik yeraltı suyu kullanılarak ardışık iki farklı işletme koşulu altında işletilmiştir. Sistem, her iki giriş nitrat konsantrasyonunda da neredeyse tam nitrat giderimi sağlamasına rağmen, düşük sülfat indirgeme performansı göstermiştir. Kolon biyoreaktöründe sülfat indirgemesiyle üretilen sülfürün yalnızca MBR'de nitrat giderimi için bir elektron kaynağı olarak kullanılması amaçlanmış olmasına rağmen, düşük sülfat giderim verimliliği, organik maddenin sülfidojenik kolon biyoreaktörden MBR'ye taşınmasına ve miksotrofik denitrifikasyon koşullarının oluşmasına neden olmuştur. Çalışma, kükürt bazlı kombine sistemlerin optimizasyonunun hem nitratın hem de sülfatın eş zamanlı ve etkin giderimi için kritik önem taşıdığını ortaya çıkarmıştır.

Anahtar kelimeler: Sülfür-bazlı denitrifikasyon, Sülfat indirgeme, Sıralı sistem, Membran biyoreaktör.

1 Introduction

Nitrate contamination in groundwater poses a global challenge due to deficiencies in sewage infrastructure, animal husbandry, septic systems, uncontrolled discharge of industrial waste and wastewater, and excessive use of fertilizers [1]. Biological denitrification, which includes both heterotrophic and autotrophic processes, is a common method to remove nitrate from water source. Heterotrophic denitrification process requires organic carbon as an electron source, whereas autotrophic denitrification process utilizes inorganic electron donors [2] to achieve complete nitrate reduction [3].

The autotrophic denitrification using inorganic electron donors has several advantages over heterotrophic denitrification. Notably, the effluent from autotrophic processes is less likely to be contaminated with organic substances, a common concern in heterotrophic denitrification. Moreover, hydrogen gas (H_2), zero-valent iron (Fe°), elemental sulfur (S°), hydrogen sulfide (H_2S), and thiosulfate ($S_2O_3^{2-}$) are generally more affordable inorganic electron donors than organic electron donors [2]. In particular, reduced sulfur compounds such as S°, H_2S and $S_2O_3^{2-}$ have advantages over other inorganic electron donors

*Corresponding author/Yazışılan Yazar

due to their non-explosive, non-toxic nature, low cost, and stability under normal conditions [4]. For example, sulfur-based denitrification processes have been preferred successfully to remove nitrate from groundwater [5], drinking water [3], and industrial wastewater [6] due to its low cost, easy handle and transport [7].

A major drawback of using reduced sulfur compounds is the production of sulfate and acidity as byproducts. Theoretically, for every milligram of nitrate nitrogen reduced, 7.54 milligrams of sulfate are expected to be produced. The US-EPA and TS266 drinking water sulfate standard of 250 mg/L [8],[9] limits the extent of nitrate reduction achievable using reduced sulfur compounds. Theoretically, the elemental sulfur-based denitrification process could reduce 33 mg/L of $N\text{-}NO_3^-$ in groundwater initially devoid of sulfate, while potentially remaining within permissible sulfate concentration limits. However, sulfate is another anion commonly present in groundwater. According to Ucar et al. (2017), sulfate concentrations in Harran Plain exhibited significant variation, ranging from 15.9±1.1 to a maximum of 425.7±36.1 mg/L. Similarly, nitrate concentrations demonstrated a wide range, with values between 4.1±0.3 mg/L and 87±1.6 mg/L [5]. The co-occurrence of nitrate and sulfate ions in groundwater limits the efficacy of denitrification processes based on reduced sulfur compounds for achieving regulatory water quality standards. Although advanced technologies such as reverse osmosis can effectively remove excess sulfate from treated water [3], they often incur high costs and operational complexities. To optimize sulfate production, a combined approach of sulfur-based denitrification and sulfate reduction can be applied. This strategy involves converting excess sulfate into hydrogen sulfide, which can then be consumed as an electron source in the denitrification. A basic stoichiometry of sulfide formation is presented in Reaction 1 below.

$$SO_4^{2-} + 2CH_2O \rightarrow H_2S + 2HCO_3^- \quad (1)$$

Sulfide in wastewater can exist in three forms: hydrogen sulfide gas (H_2S), the non-volatile ionic species hydrogen sulfide (HS^-), and sulfide (S^{2-}). The complete oxidation of S^{2-} to sulfate (SO_4^{2-}) involves the transfer of eight electrons per sulfur atom. This reaction represents a highly energy-yielding process for chemoautotrophic microorganisms [10],[11]. Simple form of the reaction is presented below [12].

$$5S^{2-} + 8NO_3^- + 8H^+ \rightarrow 5SO_4^{2-} + 4N_2 + 4H_2O \quad (2)$$

Several studies in the literature have successfully demonstrated the use of sulfide as an electron donor for effective nitrogen removal from wastewater [13]-[16]. For example, Andreides et al. (2021) investigated nitrogen removal efficiency in a packed bed reactors fed with two separate waste streams: nitrified and sulfide wastewater from an industrial plant. Nitrate removal performance exceeded 94% in the reactors operating at a maximum sulfide loading rate of 0.17 kg/(m³·d) and a nitrate-nitrogen loading rate of 0.25 kg/(m³·d) [16]. Although extensive research exists on using sulfur as an electron donor for nitrogen removal, studies investigating the conversion of sulfate, either produced during denitrification or present in the water, into sulfide through sulfate reduction, and the subsequent use of this generated sulfide as an electron donor for re-denitrification, remain relatively limited. For this purpose, this study aims to determine the performance of an innovative combined process combining sulfate reduction and denitrification processes for the simultaneous removal of nitrate and sulfate from groundwater. This process utilized sulfide-based autotrophic denitrification to reduce nitrate, while ethanol oxidation was used to reduce sulfate and produce the required sulfide. The efficiency of nitrate removal and sulfate reduction and sulfur utilization of the combined system at two different nitrate loading rates were comparatively investigated in detail.

2 Material and method

2.1 Denitrifying membrane, up-flow anaerobic sulfidogenic sequential system

In this study, a fully mixed denitrifying membrane bioreactor was coupled in parallel with an up-flow sulfidogenic column reactor, as depicted in Figure 1. The feed was initially mixed with recycled effluent from the sulfidogenic reactor and then introduced into the membrane bioreactor. Subsequently, the membrane bioreactor effluent, supplemented with ethanol, was pumped to the up-flow sulfidogenic column reactor. Half of the effluent from the column reactor was recirculated to the membrane bioreactor, while the remaining half was left the bioreactor. Four peristaltic pumps (Ismatec Reglo-Z/1-3290 ml/min interval) were used. Two pumps were used for feeding of membrane and up flow sulfidogenic reactors, one pump for suctioning and one pump was used for recycling as shown in Figure 1.

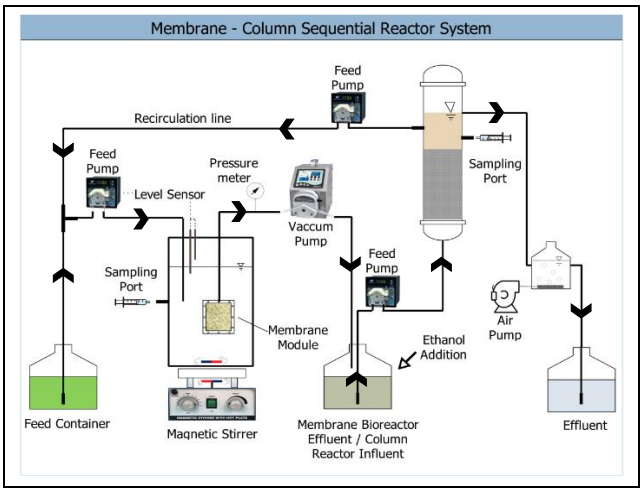


Figure 1. Denitrifying membrane-sulfidogenic up flow column reactor sequential system.

2.2 Denitrifying membrane bioreactor

The denitrifying membrane bioreactor was made of plexiglass material. The dimensions were 15 cm x 15 cm x 30 cm corresponding to 6.75 L total volume. The active volume of the reactor was 3 L, and it was covered with aluminum foil to prevent phototrophic growth. The reactor was placed on a magnetic stirrer and mixed at 150 RPM to ensure complete mixing. Double sided membrane module (10 cm x 10 cm and total area 0.02 m²) was placed in the reactor and 0.04 µm pore size flat sheet polyether sulfone (PES) ultrafiltration membrane was used. Membrane fouling was monitored by a manometer on the suctioning line. To reduce membrane fouling, intermittent suction was applied (5 min suction and 1-min relaxing). Feeding was provided by chrome probes with liquid level role (Tense SSR05).

2.3 Up-flow anaerobic sulfidogenic sequential system

Laboratory scale anaerobic up-flow glass column reactor was used. The column bioreactor has a working volume of 500 ml and has an inner diameter of 7 cm and a height of 40 cm. Aquarium sand (1-2 mm) was used as filling material and covered with aluminum foil. A recycling from the sulfidogenic reactor to denitrifying reactor was provided with a peristaltic pump to transfer alkalinity and sulfide.

2.4 Operational conditions

The system was operated at 35 °C in a temperature-controlled room for 227 days. Sludge taken from an anaerobic digester treating pulp and paper industry was used as inoculum. HRT and SRT were 1 day and infinite, respectively, during the study. In the first part of the study (days 1-154), the influent nitrate was 25 mg $N\text{-}NO_3^-$/L, while in the second part (days 155-227), nitrate was increased to 100 mg $N\text{-}NO_3^-$/L. The influent sulfate was approximately 500 mg/L and COD/SO_4^{2-} ratio was 0.67. Synthetic groundwater was prepared by adding the following chemicals to tap water: KNO_3 (181 and 722 mg/L for 25 and 100 mg $N\text{-}NO_3^-$/L, respectively), $NaSO_4$ (620 mg/L), KH_2PO_4 (50 mg/L), NH_4Cl (110 mg/L), ascorbic acid (11 mg/L), and $NaHCO_3$ (823 mg/L). To maintain a COD/SO_4^{2-} ratio of 0.67, ethanol was added at 335 mg/L COD (161 mg ethanol) for an influent sulfate concentration of 500 mg/L. In order to remove sulfide from the effluent, an aeration unit was placed on the system effluent. Aeration unit was added to the effluent tank to control the effluent sulfide. The volume of aeration unit was one liter, and it was aerated with an air pump at a flow rate of 187.5±3.12 ml/min. The cleaning of the membranes was performed physically and/or chemically when the pressure increased to 200 mbar. Physical cleaning was performed by cleaning the membrane surface with a sponge. Chemical cleaning was done by holding the membranes in 3% sodium hypochlorite solution for 1 h, and then in acidic solution adjusted to pH 3 with H_2SO_4 for 1 h. Mass balances were calculated according to the Reaction 1 and 2. Sulfide-based denitrification produces 4.28 mg SO_4^{2-}, 3.57 mg $CaCO_3$ alkalinity; consumes 1.43 mg S^{2-} for each mg $N\text{-}NO_3^-$ reduced. The results were evaluated according to this stoichiometry in each relevant section.

3 Results and discussion

3.1 Variations of sulfate and sulfide in the sulfidogenic bioreactor

The sulfidogenic column bioreactor was fed with MBR effluent by adding ethanol to maintain a constant COD/SO_4^{2-} ratio of 0.67. The average sulfate concentration in the influent of the sulfidogenic column bioreactor was 459±109 mg/L throughout the entire operation.

In the initial period, the sulfidogenic column bioreactor demonstrated a low sulfate reduction efficiency, with an approximate removal rate of 27%. The average sulfide concentration generated during this period was 43±33 mg/L. However, upon increasing the system feed nitrate to 100 mg N/L, sulfate reduction performance within the sulfidogenic column bioreactor began to decline and ultimately ceased. Consequently, sulfide production within the system was significantly reduced during the second period, with an average concentration of only 18±11 mg/L.

Numerous studies in the literature have demonstrated high sulfate removal efficiencies under similar operating conditions in the absence of nitrate. For example, Yildiz et al. (2019) achieved a significant sulfate reduction in an ethanol-fed sulfidogenic bioreactor, lowering the influent sulfate concentration of 2000 mg/L to a final level of 51±7 mg/L at COD/SO_4^{2-} ratio of 0.67 [17]. The low sulfate removal efficiency observed in this study can be attributed to two primary factors. Firstly, the microbial community within the column bioreactor may not have shifted to favor the dominance of sulfate-reducing bacteria, hindering efficient sulfate reduction. Secondly, the presence of residual nitrate in the membrane bioreactor effluent, which was subsequently fed to the column bioreactor, likely inhibited the growth and activity of sulfate-reducing bacteria. Heterotrophic nitrate-reducing microorganisms and sulfate-reducing microorganisms may be potential competitors for the same electron donors. Especially, high nitrate concentrations can create an unfavorable environment for sulfate-reducing bacteria [18]. Furthermore, some studies indicate that some specific sulfate-reducing microorganisms may preferentially utilize nitrate or nitrite as electron acceptors over sulfate under certain conditions [19],[20].

3.2 Variations of nitrate in the denitrifying membrane-sulfidogenic up-flow column reactor system

The nitrate concentration in the system feed was 25±2.3 and 101±3.5 mg N/L in the Period 1 and 2, respectively. The MBR influent was generated by mixing the system feed with the effluent from the sulfidogenic column bioreactor. This facilitated the transfer of sulfide from the sulfidogenic reactor to the MBR, providing the essential electron donor for nitrate reduction. Throughout the study, nitrate concentrations at the sulfidogenic reactor effluent remained below detectable levels (Figure 2). Consequently, the feed nitrate concentration was diluted only upon entering the MBR. The average nitrate concentration at the MBR influent inlet was 13.8±4.5 mg N/L and 40.3±10.3 mg N/L for the first and second periods of the study, respectively. At the end of the first period, the nitrate concentration at the membrane effluent decreased to an average of 0.8±2.3 mg N/L. In contrast, nitrate removal performance decreased in the second period, leading to a significant increase in the average MBR effluent nitrate to 28.8±29.02 mg N/L.

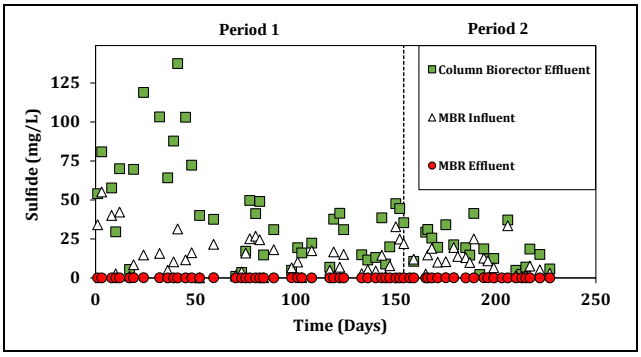


Figure 2. Variations of sulfide concentration in the denitrifying membrane-sulfidogenic up flow column reactor sequential system.

In the MBR, the aim was to establish a fully autotrophic nitrate reduction process utilizing sulfide derived from the column bioreactor. According to Reaction 1 and 2, sulfide-based denitrification produces 4.28 mg SO_4^{2-}, 3.57 mg $CaCO_3$ alkalinity; consumes 1.43 mg S^{2-} for each mg $N\text{-}NO_3^-$ reduced. During periods 1 and 2, an average of 15±13 mg/L and 11±8

mg/L of sulfur, respectively, was introduced into the MBR from the column bioreactor, by diluting with the system feed at the MBR inlet. Despite complete sulfide consumption within the MBR, the system was fed insufficient sulfide to facilitate the reduction of all incoming nitrate. Furthermore, while the column bioreactor supplied sulfide for nitrate reduction to the MBR, residual ethanol, resulting from incomplete sulfate reduction in the column bioreactor, was also transported to the MBR. This led to the formation of mixotrophic denitrification conditions within the MBR. Detailed information about COD consumption within the MBR is presented in subsequent sections.

Nitrate concentrations at the system effluent (sulfidogenic column bioreactor effluent) were consistently below the detection limit (Figure 3), indicating complete nitrate removal by the sulfidogenic column bioreactor. Heterotrophic bacteria likely utilized ethanol to remove nitrate that could not be reduced autotrophically within the column bioreactor. This heterotrophic activity may have significantly contributed to the observed low sulfate and COD removal efficiencies within the column bioreactor.

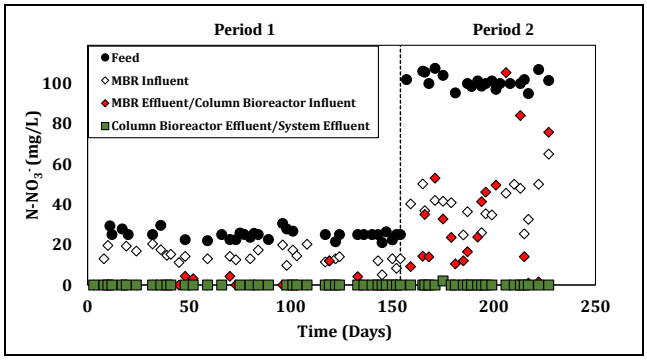


Figure 3. Variations of nitrate concentration in the denitrifying membrane-sulfidogenic up flow column reactor sequential system.

Nitrite, an intermediate product, was monitored regularly throughout our study. Elevated nitrite concentrations of 4.6±0.9 and 7.4±6.1 mg/L were observed in two specific periods (days 179-181 and 203-215), which coincided with operational issues related to the membrane bioreactor effluent (Figure 4). In all other instances, nitrite levels remained below the detection limit.

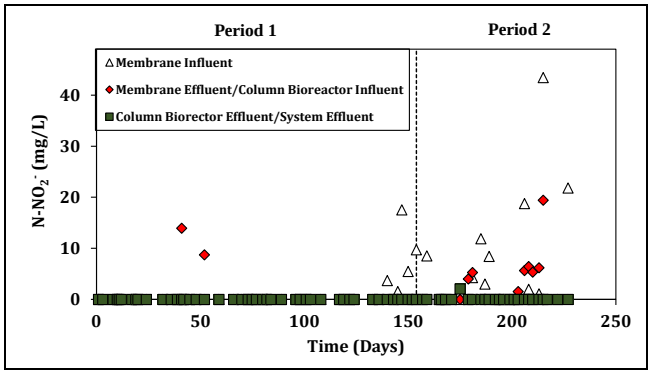


Figure 4. Variations of nitrite concentration in the denitrifying membrane-sulfidogenic up flow column reactor sequential system.

It has been observed that autotrophic denitrification bacteria dominate the whole process when nitrate is mixed with sulfide-rich anoxic sediments [21],[22]. Sulfide-based denitrification could be used in the removal of sulfate and nitrate in groundwater. There are also studies in the literature on the treatment of sulfide rich sediment sludge. The two most commonly reported denitrification bacteria in the literature are *Thiobacillus Denitrificans* and *Thiomicrospira Denitrificans* [22].

Although there are many studies in the literature that provide high nitrate removal with sulfide-based denitrification, only partial nitrate removal was achieved in this study. This limitation can be attributed primarily to insufficient sulfide delivery to the MBR, a consequence of the low sulfate reduction efficiency observed within the column bioreactor. For example, Yang et al. (2016) observed a direct correlation between nitrate removal efficiency and the sulfide/nitrogen (S/N) ratio. Their study demonstrated an approximately four-fold increase in the biomass-specific nitrate reduction rate when the S/N ratio was elevated from 3 to 5 [15]. In the study by Liang et al. (2024), nitrate, sulfide and phosphate removal efficiencies were reported as 87.63±3.12, 99.61±1.02 and 85.38±4.07%, respectively, at influent nitrate, sulfide and phosphate concentrations of 80.55±2.98 mg N/L, 380.15±20.83 mg S/L and 47.70±4.35 mg P/L, respectively and at the HRT of 8.8 h [23]. In a study by Hove et al. (2020), optimal influent concentrations for effective nitrate removal via sulfide-based denitrification in municipal wastewater were reported as follows: TKN at 30 g N/m^3, hydrogen sulfide at 42 g S/m^3, and organic matter at 12 g COD/m^3 [13].

The removal of both nitrate and sulfate from aquatic environments is typically achieved using advanced filtration methods (i.e., nanofiltration or reverse osmosis [24] or ion exchange techniques [25]) all of which generate a concentrate that must be managed. In rural areas where groundwater use for drinking water is necessary, the management of this concentrate becomes even more challenging. A process in which both nitrate and sulfate are biologically removed, instead of being concentrated, can offer a significant advantage. To this end, a robust system providing high performance can be established by combining heterotrophic denitrification and heterotrophic sulfate reduction followed by partial oxidation. However, this approach may again result in high sludge production and also require a high organic substrate input, thereby increasing operational costs. The proposed system is important because it features low sludge production, low substrate requirement, reuse of the produced sulfur, and the final discharge of both pollutants from the system boundaries. Nevertheless, the fragile structure of the system may limit its application.

In the sulfidogenic column reactor, sulfide production depends on medium pH [26], the presence of surfaces where sulfur can adsorb, and ultimately on sulfate reduction performance. Any variation in this process, and consequently low sulfide production, directly affects nitrate removal in the sulfide-based autotrophic denitrification reactor. As a result, if nitrate reaches the sulfidogenic reactor, a nitrate/sulfate competition may arise that further reduces sulfide production [27] in the sulfidogenic column reactor. This chain reaction could result in complete performance loss of the entire system.

To prevent this, ensuring continuous denitrification even during sulfide deficiency is essential. Therefore, denitrification conditions can be maintained not only with sulfide, but also with elemental-sulfur or thiosulfate-based approaches. Elemental sulfur is a particularly attractive alternative electron

donor, as it can be used as reactor filling material and dissolve when needed [28], eliminating the requirement for continuous dosing.

3.3 Variations of COD and alkalinity in the denitrifying membrane-sulfidogenic up-flow column reactor system

The column bioreactor was fed with ethanol added to the MBR effluent, and the average influent COD was 312±91 mg/L during the study. The COD concentrations in effluent of the sulfidogenic column bioreactor were averaged 197±103 and 132±43 in Period 1 and 2. COD removal efficiency in the column bioreactor exhibited an increase from 37% in the first period to 58% in the second period, despite a decrease in sulfate removal efficiency (Figure 5). This strongly suggests that heterotrophic processes are the dominant mechanism driving the high nitrate removal efficiency observed at the sulfidogenic column bioreactor effluent.

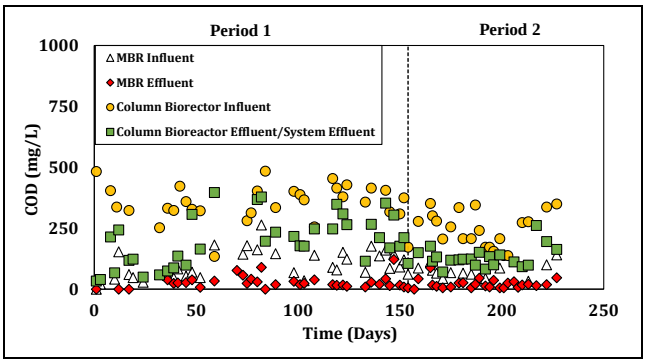


Figure 5. Variations of COD concentration in the denitrifying membrane-sulfidogenic up flow column reactor sequential system.

No external COD source was introduced into the MBR system feed. However, the recycle line transported unoxidized COD from the column reactor to the MBR. The average COD in the MBR influent was 101±59 and 76±30 mg/L in the Period 1 and 2, respectively, which was subsequently reduced to 28±26 and 22±19 mg/L in the MBR effluent. The reduction of nitrate to nitrogen gas by bacteria from the presence of organic matter is known as heterotrophic denitrification. The expected stoichiometry of an ethanol-based denitrification is presented below [29].

$$0.154NO_3^- + 0.154H^+ + 0.0833C_2H_5OH \rightarrow 0.292H_2O + 0.01C_5H_7NO_2 + 0.1167CO_2 + 0.072N_2 \quad (3)$$

According to Reaction 3, 1.77 mg ethanol is required in the ethanol-based denitrification of each gram $N\text{-}NO_3^-$. This corresponds to a requirement of approximately 3.7 mg COD for the reduction of 1 mg of $N\text{-}NO_3^-$ in the ethanol-based denitrification. Based on the measured COD concentrations in the MBR influent and effluent, an average of 19.8 and 14.6 mg $N\text{-}NO_3^-/L$ could be removed in the MBR via heterotrophic denitrification using COD carried over from the column reactor. This estimate assumes that all nitrate removal in the MBR can be attributed to this pathway.

Alkalinity variations throughout the study are visually represented in Figure 6. No significant increase or decrease was observed in the influent and effluent alkalinity concentrations of the MBR and sulfidogenic column bioreactor.

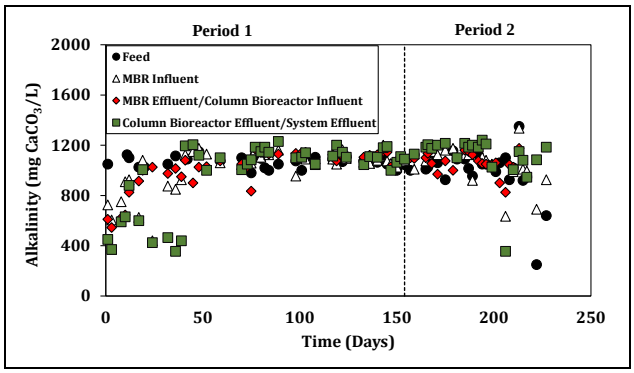


Figure 6. Variations of alkalinity concentration in the denitrifying membrane-sulfidogenic up flow column reactor sequential system.

4 Conclusion

In this study, the removal performance of high concentrations of sulfate and nitrate in groundwater by sequential autotrophic denitrification and sulfate reduction processes was investigated. Sulfate was first reduced to sulfide in an ethanol-based system and then produced sulfide was used as an electron mediator for nitrate reduction. Nitrate was almost completely removed at the system effluent but the sulfate removal efficiency of the sequential system was quite low. Ethanol-based denitrification conditions occurred in both reactors, and nitrate was reduced both partially autotrophically and heterotrophically. Operating conditions were insufficient to maintain a more dominant sulfate-reducing bacteria population in a sulfidogenic column bioreactor, and autotrophic nitrate-reducing bacteria in the MBR. Furthermore, to increase the reactor's resilience to sulfide fluctuations, an alternative electron donor should be available in the MBR in case of sulfide deficiency. Future studies could explore initially operating the denitrification reactor with elemental sulfur to promote a microbial community capable of utilizing both sulfur and sulfide, thereby maintaining nitrate removal performance during sulfide interruptions.

5 Author contribution statements

In this study, Amine Yucel conducted the collecting data and performing analyzes. Tülay Yılmaz was responsible for the evaluation and validation of the obtained results, data visualization, and preparation of the manuscript. Deniz Ucar contributed to the conceptualization of the research topic, supervision of the project, literature reviews, reviewing the manuscript.

6 Ethics committee approval and conflict of interest statement

"There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared". "There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared".

7 References

[1] Zhao B, Sun Z, Liu Y. "An overview of in-situ remediation for nitrate in groundwater". *Science of The Total Environment*, 804, 149981, 2022.

[2] Yakamercan E, Uçar D. "Environmental effects of sulfur-based autotrophic and methanol based heterotrophic denitrification processes". *Pamukkale University Journal of Engineering Science,* 28(6), 912-919, 2022.

[3] Asik G, Yilmaz T, Di Capua F, Ucar D, Esposito G, Sahinkaya E. "Sequential sulfur-based denitrification/denitritation and nanofiltration processes for drinking water treatment". *Journal of Environmental Management*, 295, 113083, 2021.

[4] Sahinkaya E, Dursun N. "Sulfur-oxidizing autotrophic and mixotrophic denitrification processes for drinking water treatment: Elimination of excess sulfate production and alkalinity requirement". *Chemosphere*, 89(2), 144–149, 2012.

[5] Ucar D, Cokgor EU, Sahinkaya E, Cetin U, Bereketoglu C, Calimlioglu B, Goncu B, Yurtsever A. "Simultaneous nitrate and perchlorate removal from groundwater by heterotrophic-autotrophic sequential system". *International Biodeterioration & Biodegradation*, 116, 83–90, 2017.

[6] Yılmaz T, Sahinkaya E. "Performance of sulfur-based autotrophic denitrification process for nitrate removal from permeate of an MBR treating textile wastewater and concentrate of a real scale reverse osmosis process". *Journal of Environmental Management*, 326, 116827, 2023.

[7] Di Capua, F. Sulfur-Based Denitrification of Organic-Deficient, Acidic, Low Temperature and Nickel Contaminated Waters in Fluidized-Bed Reactors. PhD Thesis, University of Paris-Est, Paris, France, 2016.

[8] Oh SE, Yoo YB, Young JC, Kim IS. "Effect of organics on sulfur-utilizing autotrophic denitrification under mixotrophic conditions". *Journal of Biotechnology*, 92, 1-8, 2001.

[9] Ucar D, Cokgor EU, Sahinkaya E. "Heterotrophic-autotrophic sequential system for reductive nitrate and perchlorate removal". *Environmental Technology*, 37(2), 183-191, 2016.

[10] Kodama Y, Watanabe K. "Thiohalorhabdus denitrificans gen. nov., sp. nov., an extremely halophilic, sulfur-oxidizing, deep-lineage gammaproteobacterium from hypersaline habitats". *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 54(6), 2297–3000, 2004.

[11] Sorokin DY, Tourova TP, Galinski EA, Muyzer G, Kuenen JG. "Thiohalorhabdus denitrificans gen. nov., sp. nov., an extremely halophilic, sulfur-oxidizing, deep-lineage gammaproteobacterium from hypersaline habitats". *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 58(12), 2890–2897, 2008.

[12] Cardoso RB, Sierra-Alvarez R, Rowlette P, Flores ER, Gómez J, Field JA. "Sulfide oxidation under chemolithoautotrophic denitrifying conditions". *Biotechnology and Bioengineering*, 95(6), 1148–1157, 2006.

[13] Van den Hove A, Baeten JE, Decru SO, Volcke EIP. "Potential of sulfide-based denitrification for municipal wastewater treatment". *Journal of Water Process Engineering*, 35, 101206, 2020.

[14] Liu Y, Peng L, Ngo HH, Guo W, Wang D, Pan Y, Sun J, Ni B. "Evaluation of nitrous oxide emission from sulfide-and sulfur-based autotrophic denitrification processes". *Environmental Science & Technology Journal*, 50(17), 9407–15, 2016.

[15] Yang W, Zhao Q, Lu H, Ding Z, Meng L, Chen GH. "Sulfide-driven autotrophic denitrification significantly reduces N2O emissions". *Water Research*, 90, 176–84, 2016.

[16] Andreides D, Varga Z, Pokorna D, Zabranska J. "Performance evaluation of sulfide-based autotrophic denitrification for petrochemical industry wastewater". *Journal Water Process Engineering*, 40, 101834, 2021.

[17] Yildiz M, Yilmaz T, Arzum CS, Yurtsever A, Kaksonen AH, Ucar D. "Sulfate reduction in acetate- and ethanol-fed bioreactors: Acidic mine drainage treatment and selective metal recovery". *Mineral Engineering*, 133, 52-59, 2019.

[18] Chen C, Yin G, Li Q, Gu Y, Sun D, An S, et al. "Effects of microplastics on denitrification and associated N_2O emission in estuarine and coastal sediments: insights from interactions between sulfate reducers and denitrifiers". *Water Research*, 245, 120590, 2023.

[19] Veshareh MJ, Kjeldsen KU, Findlay AJ, Nick HM, Røy H, Marietou A. "Nitrite is a more efficient inhibitor of microbial sulfate reduction in oil reservoirs compared to nitrate and perchlorate: A laboratory and field-scale simulation study". *International Biodeterioration & Biodegradation*, 157, 105154, 2021.

[20] Zhang Z, Zhang C, Yang Y, Zhang Z, Tang Y, Su P, Lin Z. "A review of sulfate-reducing bacteria: Metabolism, influencing factors and application in wastewater treatment". *Journal of Cleaner Production*, 376, 134109, 2022.

[21] Zhang M, Zhang T, Shao MF, Fang HHP. "Autotrophic denitrification in nitrate-induced marine sediment remediation and Sulfurimonas denitrificans-like bacteria". *Chemosphere*, 76(5), 677–82, 2009.

[22] Shao M, Zhang T, Fang HHP. "Autotrophic denitrification and its effect on metal speciation during marine sediment remediation". *Water Research*, 43(12), 2961–2968, 2009.

[23] Liang N, Qaisar M, Zhang K, Zhu X, Cai J, Zheng P. "Phosphorus removal performance of Sulfide-Based autotrophic denitrification process". *Chemical Engineering Journal*, 501, 157217, 2024.

[24] Jadhav SV, Marathe KV, Rathod VK. "A pilot scale concurrent removal of fluoride, arsenic, sulfate and nitrate by using nanofiltration: Competing ion interaction and modelling approach". *Journal of Water Process Engineering*, 13, 153–167, 2016.

[25] Gu B, Ku YK, Jardine PM. "Sorption and binary exchange of nitrate, sulfate, and uranium on an anion-exchange resin". *Environmental Science & Technology*, 38**,** 3184–3188, 2004.

[26] Bijmans, MFM, De Vries E, Yang C, Buisman CJN, Lens PNL, Dopson M. "Sulfate reduction at pH 4.0 for treatment of process and wastewaters". *Biotechnology Progress*, 26**,** 1029–1037, 2010.

[27] Myhr S, Lillebø BL, Sunde E, Beeder J, Torsvik T. "Inhibition of microbial H_2S production in an oil reservoir model column by nitrate injection". *Applied Microbiology and Biotechnology*, 58, 400–408, 2002.

[28] Ju X, Sierra-Alvarez R, Field JA, Byrnes DJ, Bentley H, "Bentley R. Microbial perchlorate reduction with elemental sulfur and other inorganic electron donors". *Chemosphere*, 71**,** 114–122, 2008.

[29] Yapıcı CŞA, Toprak D, Yıldız M, Uyanık S, Karaaslan Y, Uçar D. "A combo technology of autotrophic and heterotrophic denitrification processes for groundwater treatment". *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 37, 121–127, 2021.

Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 31(7), 1327-1334, 2025

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Elektro üretim tekniği kullanılarak postbiyotik içeren nanoliflerin üretimi

Production of nanofibers containing postbiotics using electrospinning method

Aleyna Sure Öztürk[1*], *Ahmet Koluman*[2]

[1]Biyomedikal Cihaz Teknolojisi Programı, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Patnos Meslek Yüksekokulu, Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi, Ağrı, Türkiye.
ozturkaleynasure@gmail.com

[2]Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye.
akoluman@pau.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 26.08.2024 Düzeltme Tarihi/Revision: 18.02.2025 doi: 10.5505/pajes.2025.23429
Kabul Tarihi/Accepted: 08.04.2025 Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Postbiyotikler, çeşitli yöntemler ile üretilen ve canlı hücre içermeyen metabolitlerdir. İçerdikleri biyoaktif ajanlar ile bulundukları ortamda antimikrobiyal, antiviral ve antienflamatuar gibi çeşitli fizyolojik aktiviteleri teşvik ederler. Canlı hücre içermedikleri için antibiyotik direnci oluşturmazlar, bağışıklığı düşük bireylerde kullanımı güvenlidir ve soğuk zincir gerektirmeyen taşıma ve depolama kolaylıkları ile probiyotiklere kıyasla birçok üstün özelliklere sahiptir. Nanolifler geniş yüzey alanı ve yüksek gözenekli yapıları ile birçok kullanım alanına sahiptir. Nanoliflerin üretiminde en sık kullanılan yöntemlerden biri elektro üretimdir. Bu çalışma kapsamında elektro üretim tekniği ile üretilen polimer nanolif örtülerin yapılarına Lactobacillus acidophilus ve Lactobacillus rhamnosus suşlarından elde edilen postbiyotiklerin dahil edilebilirliği ve nanoliflerin antimikrobiyal aktivitesi analiz edilmiştir. Yapılan analizlerden elde edilen bulgularda postbiyotiklerin nanolif örtülere dahil edilebildiği ve bununla birlikte 5 farklı patojen mikroorganizmaya karşı iyi bir antimikrobiyal etki sağladığı ortaya konmuştur.

Anahtar kelimeler: Postbiyotik, Probiyotik, Nanolif, Antimikrobiyal Elektro üretim.

Abstract

Postbiotics are metabolites produced by various methods that do not contain live cells. These metabolites promote various physiological activities, such as antimicrobial, antiviral, and anti-inflammatory effects, through the bioactive agents they contain. Since they do not contain live cells, they do not contribute to antibiotic resistance, making their use safe for individuals with compromised immune systems. Moreover, they offer several advantages over probiotics, such as not requiring a cold chain for transport and storage. Nanofibers, known for their large surface area and highly porous structure, have a wide range of applications. One of the most commonly used methods for producing nanofibers is the electrospinning technique. In this study, the incorporation of postbiotics derived from Lactobacillus acidophilus and Lactobacillus rhamnosus strains into polymer nanofiber mats produced by electrospinning was investigated, along with the antimicrobial activity of these nanofibers. The findings from the analyses demonstrated that postbiotics could be successfully incorporated into nanofiber mats and provided significant antimicrobial effects against five different pathogenic microorganisms

Keywords: Postbiotic, Probiotic, Nanofiber, Antimicrobial Electrospinning.

1 Giriş

Dünya sağlık örgütü (WHO), probiyotikleri "yeterli miktarda alındığında, konakçı sağlığına yarar sağlayan canlı mikroorganizmalardır" şeklinde tanımlamıştır. Probiyotikler fizyolojik aktivitelerin problemsiz bir şekilde gerçekleşmesine katkıda bulunarak vücudun sağlıklı ve dengede kalmasını sağlar. Probiyotiklerin insan sağlığına olan yararları çeşitli araştırmalarla ortaya konmuştur ancak bir ürünün probiyotik ürün sayılabilmesi için minimum 10^6 kob/g ya da ml canlı probiyotik bakteri içermesi ve bunu koruyabilmesi gerekmektedir [1]. Fakat çevre koşullarına duyarlılıkları sebebiyle uzun vadede metabolik aktivitelerini ve canlılıklarını koruyabilmeleri oldukça güçtür [2]. Ayrıca yapılan araştırmalar sonucunda ortaya konmuştur ki probiyotiklerin sağladığı klinik faydalar ve fizyolojik mekanizmaların gerçekleşmesi için mikrobiyal canlılığa gerek yoktur [3]. Tüm bu veriler göz önünde bulundurulduğunda postbiyotik kavramı öne çıkmaktadır.

Postbiyotikler, bakterilerin metabolik faaliyetleri sonucu ortaya çıkan, enzim, peptid, bakteriyosin gibi çeşitli moleküllerdir. Canlı mikroorganizma içermedikleri halde probiyotikler ile özdeşleştirilmiş benzer mekanizmalar sayesinde sağlığa faydalı etkiler göstermekle birlikte vücuda canlı mikroorganizma alımının getirdiği riskleri de minimalize etmektedir [4]. Canlının fizyolojik fonksiyonlarını iyileştirerek sağlığına olumlu yönde etki yapan postbiyotikler, antimikrobiyal, antiinflamatuar, antiproliferatif ve antioksidan gibi çeşitli biyolojik aktiviteleri teşvik etmektedir [5]. Sharma ve diğ. (2018) yapmış oldukları bir çalışmada *Pseudomonas aeruginosa* PAO1 biyofilmine karşı probiyotik mikroorganizmalardan izole edilen bakteriyosin ve ekzopolisakkarit postbiyotiklerinin anti-biyofilm potansiyel etkisi incelenmiştir. Filogenetik analiz ile izole bakterilerin *Lactobacillus fermentum* olduğu belirlenmiştir. Çalışmada plakalar çeşitli bakteriyosin, ekzopolisakkarit ve bunların kombinasyonu ile kaplanmıştır. Biyofilm oluşumunu gözlemlemek için lazer tarama mikroskobu kullanılmış ve akış sitometrisi ile biyofilm oluşturan canlı hücrelerin ölçümü yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda kaplanan plakalarda biyofilm oluşumuna sebep olan canlıların sayısında önemli seviyede azalma olduğu ortaya konmuştur [6]. Yordshahi ve diğ. (2020), bakteriyel nanoselülozdan (BNC) ürettikleri antimikrobiyal özellikte nanokağıt üretmiş ve içerisine liyofilize postbiyotik dahil ederek et sarma kâğıdı olarak kullanımını araştırmışlardır. *L. plantarum* suşundan elde edilen postbiyotikler, emdirme ile BNC filmlere katkılanmıştır.

Postbiyotik içeren filmlerin *L. monocytogenes'e* karşı antimikrobiyal etki gösterdiği ve bu etkinin artan postbiyotik konsantrasyonu ile arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca postbiyotiklerin BNC kâğıttan gıdaya hızla salınarak et yüzeyinde çözünmesi, istenmeyen duyusal değişikliklere sebep olmadan gıdanın raf ömrünü uzatmayı başarmıştır [7].

Biyolojik açıdan incelendiğinde doğada kendiliğinden var olan ipek, selüloz, kolajen gibi birçok biyomalzemenin lif formunda biriktirilmesinden yola çıkılarak biyomimetik bir yaklaşımla biyolojik sistemleri taklit etmek için polimer nanoliflerin kullanımı oldukça uygun bir yaklaşımdır [8]. Nanolifler, teorik olarak sınırsız uzunluğa sahip ve genel olarak çapı 1000 nm' den küçük olan katı liflerdir. Çok küçük gözenek boyutu ve yüksek yüzey alanına sahip olmaları, nanolifleri çeşitli alanlardaki uygulamalar için çekici hale getirmektedir [9].

Nanoliflerin üretim teknikleri arasında elektro üretim, düşük maliyetli oluşu, geniş polimer yelpazesine sahip olması ve kolay uygulanabilirliği ile sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir. Yüksek voltaj sağlayan bir güç kaynağı, polimer çözeltisinin beslenmesi ve biriktirme alanından oluşan elektro üretim, kontrollü bir şekilde nano boyutlarda liflerin elde edilmesine imkân vermektedir [10]. 2023 yılında yapılmış bir çalışmada elektro üretim tekniği kullanılarak antimikrobiyal ajan içeren PVA nanolifler üretilmiş ve karakterizasyon testleri ile morfolojik yapısı ve yara örtüsü olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Antimikrobiyal ajan olarak nerolidol (NER) kullanılmıştır. Yapılan analizlerde NER konsantrasyonunun artması ile temas açısında da artış olduğu görülmüş, böylelikle NER moleküllerinin varlığı doğrulanmıştır. Disk difüzyon yöntemi ile antimikrobiyal etkisi araştırılan nanoliflerde, saf PVA'nın antimikrobiyal özellik göstermemesine bağlı olarak NER içermeyen liflerde inhibisyon bölgesi oluşmamakla birlikte, NER içeren matların hem Gram pozitif hem de Gram negatif bakterilere karşı değişik oranlarda inhibisyon alanı oluşturarak antimikrobiyal aktivite göstermiştir [11]. Böylelikle PVA nanoliflere antimikrobiyal ajan dahil edilmiş ve başarılı bir biçimde elektro üretim ile antimikrobiyal etki gösteren nanolifler elde edilmiştir.

Bitki özleri ve esansiyel yağlar, içerdikleri kimyasal bileşenler sayesinde yara iyileşmesini hızlandıran ve nanoliflerin yapısına dahil edilen antimikrobiyal ajanlardan biridir. Bu kapsamda yapılan çalışmalardan birinde Güler ve diğ. (2019) tarçın uçucu yağı içeren PVP nanolifler üretmişlerdir. Genel olarak üniform yapıda nanolifler elde edilmiş, uçucu yağ ilavesinin lif çapını arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca disk difüzyon testi uygulandığında yalnızca PVP içeren nanoliflerin antibakteriyel etki göstermediği, uçucu yağ içeren örneklerin iyi birer antibakteriyel etki gösterdiği ortaya konmuştur. Ek olarak nanolifli malzemenin artışıyla daha iyi antibakteriyel etki gözlemlenmesi uçucu yağ dağılımının nanolif yüzeyinde tekdüze olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla PVP nanolifler, antibakteriyel ajan dağılımı için iyi bir polimer olabilmektedir [12].

Bu çalışmada iki farklı bakteriden termal inaktivasyon sonrasında santrifüj tekniği ile üretilen postbiyotiklerin, nanoliflere dahil edilebilirliği araştırılmıştır. Bu kapsamda, üretilen postbiyotikler elektro üretim tekniği kullanılarak polivinil alkol (PVA) ve polivinil pirolidon (PVP)' a entegre edilmiş ve antimikrobiyal aktiviteleri incelenmiştir.

2 Gereç ve yöntem

2.1 Gereç

Nanoliflerin elde edilmesinde kullanılan Polivinil alkol (PVA) (125.000 MW, %99 hidrolize), Polivinilpirolidon (PVP) K90 ve Etanol, Sigma-Aldrich Co. (St Louis, A.B.D.) firmasından temin edilmiştir. Postbiyotik elde edilen *Lactobacillus acidophilus* (ATCC 4356) ve *Lactobaciluus rhamnosus* (ATCC 7469) suşları ATCC kültürler olarak alınmıştır. Bakterilerin ekildiği Tyriptic Soy Broth sıvı besiyeri Lab M (Heywood, UK) firmasından tedarik edilmiştir.

2.2 Yöntem

2.2.1 PVA çözeltisinin hazırlanması

1 g PVA tartılıp üzerine 9 g distile su eklenmesiyle %10 (a/a) polimer çözeltileri elde edilmiştir. Hazırlanan çözeltiler manyetik karıştırıcıda 90°C'de 500 rpm hızında homojenize oluncaya dek karıştırılmıştır.

2.2.2 PVP çözeltisinin hazırlanması

1 g PVP polimeri tartılıp üzerine 9 g Etanol eklenerek %10 (a/a) PVP çözeltileri hazırlanmıştır. Hazırlanan çözeltiler manyetik karıştırıcıda 50°C'de 500 rpm hızında homojenize oluncaya dek karıştırılmıştır.

2.2.3 Sıvı besiyerin hazırlanması

Bakterilerin üremesi için gerekli Tyriptic Soy Broth (TSB) çözeltisi 300 ml hazırlanarak dispenser ile her birine 9 ml olacak şekilde cam tüplere dağıtılmıştır. Cam tüpler içerisindeki TSB çözeltileri otoklavlanarak sterilize edilmiştir.

2.2.4 Fizyolojik tuzlu su (FTS) hazırlanması

Fizyolojik tuzlu suyun hazırlanması için hassas terazi ile 9 g tartılmış ve steril cam şişe içerine konmuştur. Üzerine 1 litre distile su eklenerek %0.9 (a/h) konsantrasyona sahip çözelti karışım elde edilmiştir. Hazırlanan karışım homojenize oluncaya dek manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Homojenize çözelti otoklavlanarak sterilize edilmiştir.

2.2.5 Probiyotiklerin zenginleştirilmesi

L. acidophilus ve *L. rhamnosus* suşları referans kültür olarak kullanılmıştır. Her işlem iki suş için ayrı ayrı yapılmıştır. Suştan 1 öze dolusu alınıp öncesinde hazırlanan TSB içerisine aktarılarak 37°C'de 24 saat inkübe edilmiştir. İnkübasyonun ardından mikropipet ile 1 ml alınarak ayrı ayrı sıvı besiyeri içerisine aktarılmış ve 37°C'de 24 saat inkübe edilerek zenginleştirme yapılarak bakteriler hazırlanmıştır.

2.2.6 Pelet Eldesi

Zenginleştirilmiş probiyotik kültürü, 4000 rpm'de 10 dakika süreyle santrifüj edilerek probiyotik hücreleri besi ortamından ayrıştırılmıştır. Dibe çöken pelet (probiyotik hücreleri) korunarak üstte kalan solüsyon (besi ortamı) atılmıştır.

2.2.7 Yıkama işlemi

Elde edilen pelet üzerine 5 ml FTS eklenmiş ve vorteks ile karıştırılmıştır. Karışım tekrardan 4000 rpm'de 10 dakika süreyle santrifüj edilmiş ve bu işlem toplamda 4 kez tekrar edilerek probiyotikler daha da saflaştırılmıştır. Son yıkamadan sonra 1 ml FTS eklenmiş ve vorteks ile homojenize edilmiştir.

2.2.8 Probiyotiklerin parçalanması ve elektro üretim işlemi için nihai çözeltinin hazırlanması

Homojenize edilmiş probiyotik süspansiyonu, hazırlanmış olan PVP ve PVA çözeltisinden 9 g alınıp üzerine eklenmiş ve 90°C'de 30 dakika boyunca manyetik karıştırıcı ile homojenize edilmiştir. Böylelikle canlı bakteriler ısı yoluyla patlatılmış ve postbiyotik içeren polimer çözeltisi hazırlanmıştır.

2.2.9 Elektro üretim

Hazırlanan boş polimer çözeltileri ve postbiyotik içeren çözeltiler ucunda metal iğne bulunan enjektöre doldurulmuş ve metal iğne güç kaynağına bağlanarak elektriksel olarak yüklenmiştir. Yüklü çözelti, toprağa bağlı metal toplayıcı plaka üzerine çekilerek nanolifler elde edilmiştir. Çekim işlemi 15 cm mesafeden 5 saat boyunca 15 kV uygulanarak 1 ml/sa. besleme hızı ile gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen nanoliflerin isimleri ve içerikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Nanolif örneklerine ait içerikler.

Table 1. Contents of nanofiber samples.

Nanolif Örneği	Polimer	Bakteri
PVA0	PVA	-
PVP0	PVP	-
PVA/LA	PVA	*Lactobacillus acidophilus* (ATCC 4356)

3 Karakterizasyon

3.1 Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FESEM)

Üretilen nanolifler, alan emisyonlu elektron mikroskobu (FESEM) kullanılarak morfolojik analizi yapılmıştır. Tüm numuneler, %80 altın ve %20 paladyum ile 400 saniye boyunca kaplanarak iletken hale getirilmiştir. Tüm görüntüler, 20 kV ile çalışılıp 5000x ve 10000x büyütme oranları ile alınmıştır. Image J programı kullanılarak elde edilen görüntülerden ortalama nanolif çapları hesaplanmıştır.

3.2 Nanoliflerin antimikrobiyal aktivitesinin belirlenmesi

Çalışma kapsamında üretilen PVA0, PVP0, PVA/LA, PVP/LA, PVA/LR ve PVP/LR nanoliflerinin antimikrobiyal aktiviteleri incelenmiştir. Bu kapsamda Uluslararası Standartlar Teşkilatı (International Organization for Standardization, ISO) 20645 (Tekstil Ürünleri için agar difüzyon antimikrobiyal testi standardı) çerçevesinde analizler yapılmış ve Tablo 2'de belirtilen mikroorganizmalar ile 8 log kob/ml'lik bakteri stoğu hazırlanmış, sonrasında 100 µL agar yüzeyine aktarılmış ve drigalski spatülü ile yayılmıştır. Bu bağlamda, PVA0, PVA/LA, PVA/LR, PVP, PVP/LA ve PVP/LR nanoliflerinden numuneler (25±5mm çaplı) hazırlanıp yüzeye konularak 37 °C'de 24 saat boyunca inkübasyon sağlanmıştır.

4 Bulgular ve tartışma

Shankhwar ve diğ. (2016) yaptıkları bir çalışmada elektro üretim tekniği ile antibiyotik yüklü PVA/PVP kompozit membranlar üretmiş ve bunların ilaç salınım kapasitesini, antimikrobiyal özelliğini ve biyouyumluluklarını incelemişlerdir. Ayrıca kompozit membranların üretiminde PVA: PVP oranı değiştirilerek mekanik özellikleri nasıl etkilediğine bakılmıştır. Sonuçlar membranların, kapsüllenmiş antibiyotiğin sürekli salınımını sergilediği ve ayrıca patojen mikroorganizmalara karşı lokal antimikrobiyal özellik gösterdiği ortaya konmuştur. Fibroblast ve keratinosit hücrelerinin in vitro kültürü, nanolif membranların biyouyumlu olduğunu doğrulamıştır. PVP ilavesi, membranların mekanik özelliklerini önemli seviyede iyileştirdiği mekanik testler sonucu ortaya konmuştur. Tüm bu sonuçlara bakıldığında PVP/PVA membranların antimikrobiyal ajan salımı ve mekanik açıdan uygun birer etkileşimli nanolif olarak kullanılabilirliğini doğrulamaktadır [13].

4.1 PVA0, PVA/LA ve PVA/LR nanoliflerinin FESEM analiz sonuçları

FESEM analizi sonucu elde edilen görüntülerden rastgele 30 adet lif seçilerek çapları ölçülmüş ve ardından ortalama lif çapı hesaplanmıştır. Bu prosedür tüm numuneler için gerçekleştirilmiştir. PVA nanoliflerine ait ortalama lif çapı sırayla; PVA0 = 335.146 nm, PVA/LA = 450.338 nm ve PVA/LR=263.177 nm. Tablo 3'te nanoliflere ait çap ölçümleri verilmiştir.

Bu çalışmada tüm numuneler göz önüne alındığında PVA nanoliflerin çapları 222.785 nm ile 612.323 nm arasında olup ortalama 349.553 nm'dir. Yapılan bir çalışmada sarı kantaron yağı içeren PVA nanoliflerinin ortalama çapının 82 ± 17 nm ile 208 ± 105 nm arasında olduğu bildirilmiştir [14]. Benzer bir çalışmada kitosan içeren PVA nanoliflerinin ortalama çaplarının 172 ± 60 ile 257 ± 63 arasında değiştiği bildirilmiştir [15]. Ek olarak jelatin içeren PVA nanoliflerinin çapının 177 nm ile 340 nm arasında değiştiği bildirilmiştir [16].

PVA0, PVA/LA ve PVA/LR nanolif örneklerine ait FESEM görüntüleri sırasıyla Şekil 1, Şekil 2 ve Şekil 3 'te verilmiştir.

Tablo 2. Antimikrobiyal aktivite analizinde kullanılan mikroorganizma kültürleri.

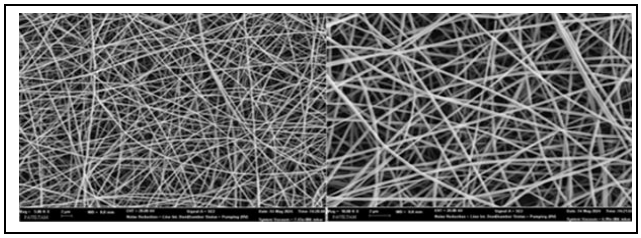
Table 2. Microorganism cultures used in antimicrobial activity analysis.

Mikroorganizma	Türü	Gram Türü	ATCC No
Listeria monocytogenes	Bakteri	Pozitif	35152
Staphylococcus epidermidis	Bakteri	Pozitif	14990
Bacillus cereus	Bakteri	Pozitif	14579
Aspergillus brasiliensis	Mantar		16404
Salmonella typhimurium	Bakteri	Negatif	14028

Tablo 3. PVA nanoliflerin ortalama çapları

Table 3. Average diameters of PVA nanofibers

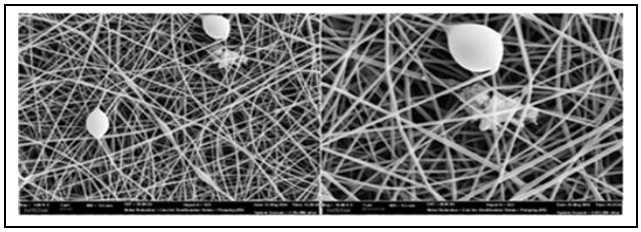
Nanolif Örneği	Maksimum Çap (nm)	Minimum Çap (nm)	Ortalama Çap (nm)
PVA0	561.637	222.785	335.146
PVA/LA	612.323	317.012	450.338
PVA/LR	320.973	160.486	263.177



(a) (b)

Şekil 1. PVA0 nanolif örneğine ait FESEM görüntüleri. (a): 5000X-PVA0. (b): 10000X-PVA0.

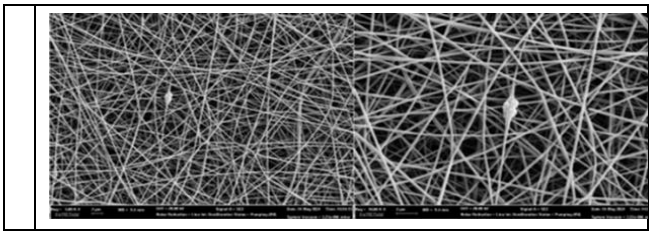
Figure 1. FESEM images of PVA0 nanofiber sample. (a): 5000X-PVA0. (b): 10000X-PVA0.



(a) (b)

Şekil 2. PVA/LA nanolif örneğine ait FESEM görüntüleri. (a): 5000X-PVA/LA. (b): 10000X-PVA/LA.

Figure 2. FESEM images of PVA/LA nanofiber sample. (a): 5000X-PVA/LA. (b): 10000X-PVA/LA.



(a) (b)

Şekil 3. PVA/LR nanolif örneğine ait fESEM görüntüleri. (a): 5000X-PVA/LR. (b): 10000X-PVA/LR.

Figure 3. FESEM images of PVA/LR nanofiber sample. (a): 5000X-PVA/LR. (b): 10000X-PVA/LR.

Postbiyotiklerin nanoliflere dahil edilmesi üzerine yapılan çalışmada, *Bacillus coagulans*'tan elde edilen ve yeni bir postbiyotik türü olan Lactosporin kullanılmıştır. Lactosporin, Hyaluronik asit (HA)/PVA/Kitosan (CS) bazlı nanoliflere dahil edilmiş ve 6 farklı bakteri türüne karşı antibakteriyel etkisi araştırılmıştır. Üretilen nanolif membranların tekdüze ve boncuksuz yapıya sahip olduğu görülmüştür. Membranlar, minimum inhibisyon konsantrasyonu testinde tüm mikroorganizmalara karşı aktif etki göstermiş ve *Escherichia coli, Micrococcus Luteus, Pseudomonas aeruginosa, Staphylococcus aureus, Staphylococcus epidermis ve Klebsiella pneumonia* dahil olmak üzere altı bakteri türüne karşı üstün antibakteriyel özellikler göstermiştir [17]. Yapmış olduğumuz çalışmada da PVA/LA nanolif örneği hariç tamamının boncuksuz olduğu gözlemlenmiştir. Boncuklu yapıya sebebiyetin örneğin hazırlanması ve üretim aşamasındaki dış koşullardan veya homojenizasyondan kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

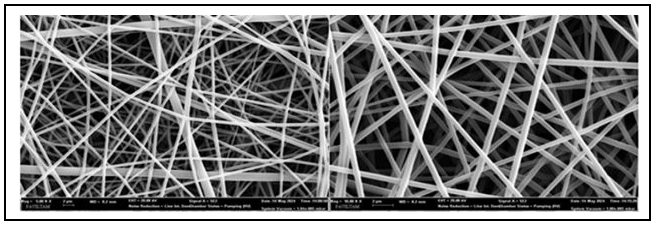
4.2 PVP0, PVP/LA ve PVP/LR nanoliflerinin FESEM analiz sonuçları

FESEM analizi sonucu elde edilen görüntülerden rastgele 30 adet lif seçilerek çapları ölçülmüş ve ardından ortalama lif çapı hesaplanmıştır. Bu prosedür tüm numuneler için gerçekleştirilmiştir. PVP nanoliflerine ait ortalama lif çapı sırayla; PVP0=608.069 nm, PVP/LA=535.513 nm ve PVP/LR=490.929 nm. Tablo 4'te nanoliflere ait çap ölçümleri verilmiştir. PVP nanolif örneklerine ait FESEM görüntüleri Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir.

Tablo 4. PVP nanoliflerin ortalama çapları.

Table 4. Average diameters of PVP Nanofibers.

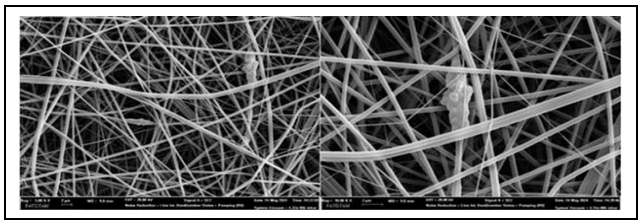
Nanolif Örneği	Maksimum Çap (nm)	Minimum Çap (nm)	Ortalama Çap (nm)
PVP0	755.217	500.807	608.069
PVP/LA	781.520	346.678	535.513
PVP/LR	762.056	335.584	490.929



(a) (b)

Şekil 4. PVP0 nanolif örneğine ait FESEM görüntüleri. (a): 5000X-PVP0. (b): 10000X-PVP0.

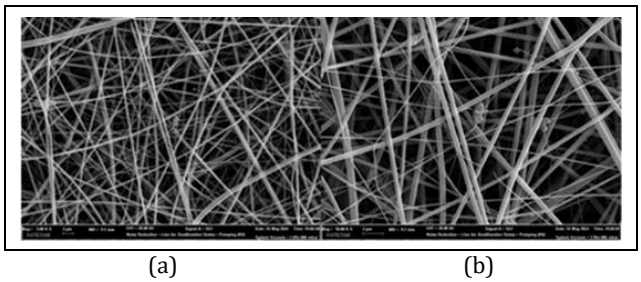
Figure 4. FESEM images of PVP0 nanofiber sample. (a): 5000X-PVP0. (b): 10000X-PVP0.



(a) (b)

Şekil 5. PVP/LA nanolif örneğine ait FESEM görüntüleri. (a): 5000X-PVP/LA. (b): 10000X-PVP/LA.

Figure 5. FESEM images of PVP/LA nanofiber sample. (a): 5000X-PVP/LA. (b): 10000X-PVP/LA.



(a) (b)

Şekil 6. PVP/LR nanolif Örneğine ait FESEM görüntüleri. (a): 5000X-PVP/LR. (b): 10000X-PVP/LR.

Figure 6. FESEM images of PVP/LR nanofiber sample. (a): 5000X- PVP/LR. (b): 10000X- PVP/LR.

4.3 Antimikrobiyal aktivite analiz sonuçları

Test sonuçları değerlendirilirken ISO 20645'te belirtilen prosedür uygulanmıştır. Bu bağlamda nanolif numunesi çevresinde 1 mm'den fazla bölgenin oluşması, 0-1 mm'lik bölgenin oluşması ve numunenin doğrudan altında büyümenin olmaması antimikrobiyal etkinin oluştuğunu göstermektedir. Mikroorganizma gelişiminin baskılanmış ve zayıf oluşu sınırlı aktivite, geri kalan durumlar ise antimikrobiyal aktivitenin olmayışını belirtmektedir. ISO 20645'te belirtilen değerlendirme kriterleri Tablo 5'te listelenmiştir.

Tablo 5. Antibiyogram sonuç değerlendirmesi.

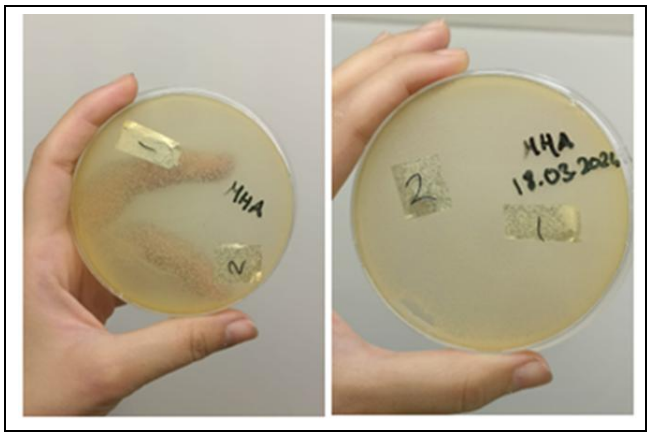
Table 5. Antibiogram result evaluation.

İnhibasyon Bölgesi (mm) Ortalama Değeri	Üreme[a)]	Açıklama	Yorum
>1	Yok	1 mm'den fazla inhibisyon alanı, mikroorganizma artışı yok [b)]	İyi etki
0-1	Yok	1 mm'ye kadar oluşan inhibisyon alanı, mikroorganizma artışı yok [b)]	İyi etki
0	Yok	Hem mikroorganizma artışı hem de inhibisyon alanı yok [c)]	İyi etki
0	Az	İnhibisyon bölgesi bulunmamakla birlikte, sınırlı koloni mevcut olup, büyüme neredeyse tamamen durdurulmuştur.	Sınırlı etki
0	Orta	İnhibasyon alanı oluşmamakla birlikte, kontrol grubu ile kıyaslandığında büyüme yarı yarıya baskılanmıştır [e)]	Yetersiz etki
0	Yoğun	İnhibisyon alanı yok, kontrol grubuna göre üremede baskılanma yok veya çok az var	Yetersiz etki

(a): Örneğin altındaki besi yerinde bakteri gelişimi,
(b) : İnhibisyonun kapsamı yalnızca kısmen değerlendirilmelidir. Geniş inhibisyon alanı, aktif maddelerin belirli kaynaklarını veya bir ürünün substrat üzerinde zayıf biçimde bağlandığını ortaya koyabilir,
(c): İnhibisyon alanının oluşmaması, aktif maddenin düşük yayılabilirliğinden kaynaklanabileceğinden, inhibisyon bölgesi oluşmadan üremenin baskılanması iyi etki olarak tanımlanabilir.
(d) : Tamamen büyümenin engellenmesi kadar etkili olması" aktivite sınırlarını ortaya koymaktadır.
(e): Mikrobiyal büyümenin azaltılması ya koloni çapı ya da koloni sayısı anlamına gelmektedir.

Üretilen tüm nanolif örneklerinin *Listeria monocytogenes* (LM), *Staphylococcus epidermidis* (SE), *Bacillus cereus* (BC), *Aspergillus brasiliensis* (AB) ve *Salmonella typhimurium* (ST)'a karşı antimikrobiyal analizi yapılmıştır.

Değerlendirme kapsamında elde edilen PVA0 ve PVP0 nanolif örnekleri, daha önce bilinen bir antimikrobiyal özelliğe sahip olmamalarına bağlı olarak antimikrobiyal analizde kontrol numuneleri olarak kullanılmış ve antimikrobiyal etki göstermemişlerdir. Şekil 7'de PVA0 ve PVP0 nanolif örneklerinin altında ve çevresinde üreme oluştuğu açıkça görülmektedir.



(a) (b)

Şekil 7. PVA0 ve PVP0 nanolif örneklerine ait antimikrobiyal analiz görüntüsü.

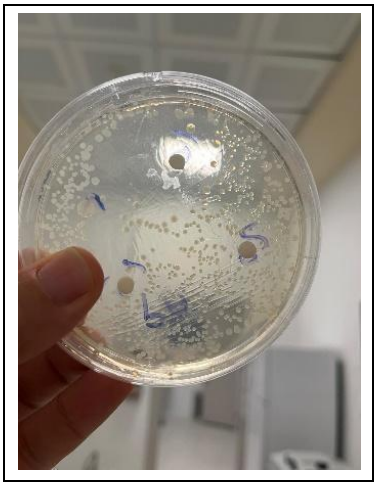
(a) : PVA0. (b): PVP0.

Figure 7. Antimicrobial analysis image of PVA0 and PVA0 nanofiber samples.

(a) : PVA0. (b): PVP0.

PVA/LA nanolif örneği LM hariç diğer tüm (SE, BC, AB ve ST) mikroorganizmalara karşı iyi antimikrobiyal etki göstermiş, LM ye karşı etki göstermemiştir. PVP/LA ve PVP/LR nanolif örnekleri tüm mikroorganizmalara karşı iyi seviyede antimikrobiyal etki göstermiş, örneklerin üzerinde hiçbir üreme gözlemlenmemiştir. PVA/LR nanolif örneği tüm mikroorganizmalara karşı iyi seviyede antimikrobiyal etki göstermiş, ST'ye karşı ayrıca inhibisyon bölgesi oluşturmuştur.

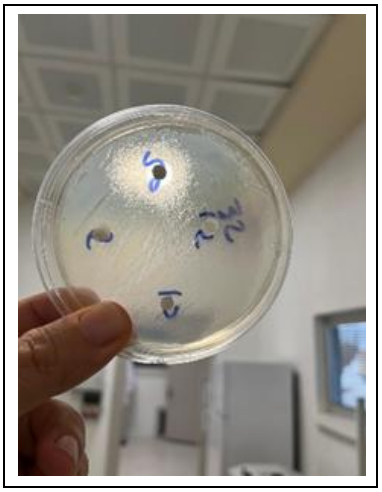
Şekil 8'de PVA/LR, PVA/LA, PVP/LR ve PVP/LA nanolif örneklerinin *Staphylococcus epidermidis* patojenine karşı gösterdiği antimikrobiyal etki görülmektedir. Numunelerin altında mikroorganizma gelişiminin gözlemlenmemesi, nanoliflerin iyi seviyede antimikrobiyal etki gösterdiğini ortaya koymaktadır. Sol üst numune PVA/LA, sağ üst numune PVA/LR, sağ alt numune PVP/LA ve sol alt numune PVP/LR nanolif örneklerine aittir.



Şekil 8. Postbiyotik içeren nanoliflerin *Staphylococcus epidermidis'e* karşı gösterdiği antimikrobiyal etki.

Figure 8. Antimicrobial effect of postbiotic containing nanofibers against Staphylococcus epidermidis.

Şekil 9, PVA/LR, PVA/LA, PVP/LR ve PVP/LA nanolif örneklerinin *Salmonella typhimurium* patojenine karşı gösterdiği antimikrobiyal etkiyi ortaya koymaktadır. Sol üst numune PVA/LA, sağ üst numune PVA/LR, sağ alt numune PVP/LA ve sol alt numune PVP/LR nanolif örneklerine aittir. Tüm numunelerin altında üreme gözlenmemekle birlikte sağ üstteki numunenin (PVA/LR) oluşturduğu inhibisyon bölgesi açıkça görülmektedir.



Şekil 9. Postbiyotik içeren nanoliflerin *Salmonella typhimurium*'a karşı gösterdiği antimikrobiyal etki.

Figure 9. *Antimicrobial effect of postbiotic containing nanofibers against Salmonella typhimurium.*

Yara ve yanık yüzeyinden izole edilen patojen mikroorganizmalara karşı farklı bakteri türlerinin antimikrobiyal etkisinin karşılaştırıldığı bir çalışmada, *Lactobacillus rhamnosus GG* ve *Lactobacillus acidophilus*' tan elde edilen bakteriyosinlerin, 70 hastadan toplanan sürüntü örneklerinden elde edilen *P. aeruginosa*' ya karşı antimikrobiyal etkisi incelenmiştir. Elde edilen tüm *P. aeruginosa* izolatları proteaz üretebilmektedir. *P. aeruginosa*, çoklu antibiyotik direnci gösterdiği halde elde edilen bakteriyosinlerin proteaz üzerinde antimikrobiyal etki gösterdiği gözlemlenmiş, ayrıca *L. acidophilus*'un en yüksek antimikrobiyal etki bölgesi 25 mm, *L. rhamnosus*'un ise 32 mm olarak ölçülmüştür [18]. Yapmış olduğumuz çalışma ile aynı bakteri suşlarının kullanıldığı bu çalışma, kullanılan türlerin antimikrobiyal etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

5 Sonuçlar

Nanoteknolojinin de ilerlemesi ile özellikle son birkaç on yıldır birçok farklı özellikte nanolif membranlar geliştirilmektedir. Nanolifler, sahip oldukları geniş yüzey alanı ve yüksek gözeneklilikleri ile çeşitli biyoaktif ajanların entegrasyonuna ve bunların salınımı için uygun yapıdadırlar. Postbiyotikler mikroorganizma kaynaklı metabolitlerdir. Çeşitli yöntemler kullanılarak inaktive edilen bakterilerden elde edilen postbiyotikler, canlı hücre içermemeleri sebebiyle kullanımları güvenlidir ve probiyotiklerin tabi tutulduğu sınırlamalara dahil değildirler. Yapılan birçok araştırma postbiyotiklerin birçok fizyolojik aktivite ile konağın olağan sağlık durumuna iyi yönde etki ettiği kanıtlanmıştır. Jamaran ve diğ. (2021) yaptıkları bir çalışmada solvent döküm tekniğini kullanarak *Lactobacillus reuteri* 'den elde ettikleri hücresiz süpernatant ile postbiyotik/kitosan/polietilen glikol (PEG) bazlı bir biyobozunur film üreterek hayvan deneyleri ile yara örtüsü olarak kullanımını araştırmışlardır. Hayvan deneyleri; bir kontrol grubu, bir kitosan grubu ve bir postbiyotik grubu olmak üzere 3 gruba ayrılan 45 erkek sıçan üzerinde tam kalınlıkta eksizyonel yaralar açılarak yapılmıştır. Üretilen filmlerle antimikrobiyal analiz ve gen ekspirasyonu analizi yapılmıştır. Yapılan incelemelerde postbiyotik içeren filmlerin, yaralarda enfeksiyona sebep olan patojenleri inhibe ettiği ve antimikrobiyal özellik sergilediği görülmüştür [19].

Postbiyotiklerin yara iyileşmesine olan etkilerinin incelendiği bir çalışmada ise Golkar ve diğ. (2021) *Lactobacillus fermentum, Lactobacillus reuteri ve Bacillus subtilis sp. natto* olmak üzere farklı probiyotik suşlarından elde edilen postbiyotikleri içeren 3 farklı topikal soğuk krem formülasyonu hazırlayarak sıçan modeli üzerinde etkinlikleri araştırılmıştır. Bu kapsamda yapılan deneylerde postbiyotik içeren kremler, postbiyotik içermeyen krem uygulanan ve hiçbir tedavi uygulanmayan kontrol grubu sıçanlarla kıyaslanarak test edilmiştir. Postbiyotik içeren formülasyonların, kontrol grubuna göre iyileşme sürecinde hızlı oldukları göstermiştir. Ayrıca *Bacillus subtilis natto* postbiyotiği içeren krem formülasyonları arasında en iyi iyileşme gösteren grup olmuştur. Hidroksiprolin, doku onarımı ve kolajen sentezinin göstergesi olan bir parametredir. *Bacillus subtilis natto* ile üretilen postbiyotik içeren krem, diğerlerine kıyasla en fazla hidroksiprolin üreten formülasyon olmuştur. Çalışmada, 14 gün sonunda yara iyileşmesinin detaylı değerlendirilmesi için yapılan histolojik analizde epitelizasyon, inflamasyon, granülasyon ve fibrozis gibi süreçler puanlanarak değerlendirme yapılmıştır. Postbiyotik içermeyen soğuk krem ile tedavi edilen, *Lactobacillus fermentum* postbiyotiği içeren ve tedavi uygulanmayan sıçanlarda eksik epitelizasyon gelişirken, *Lactobacillus reuteri* ve *Bacillus subtilis sp. natto* suşlarından elde edilen postbiyotikle hazırlanan kremler ile tedavi edilen sıçanlarda tam epitelizasyon görülmüştür. Enflamasyon derecesi gruptan gruba değişiklik göstermiştir. Postbiyotik içermeyen ve herhangi bir tedavi uygulanmayan soğuk kremle tedavi edilen gruplarda en yüksek enflamasyon görülürken, *Lactobacillus reuteri* soğuk kremi ile tedavi edilen grupta enflamasyon gelişmemiştir. Genel olarak histolojik değerlendirme sonuçlarına bakıldığında postbiyotik içeren soğuk kremlerin yara iyileşmesini desteklediği ortaya konmuştur [20].

Bu çalışma kapsamında elektro üretim tekniği kullanılarak postbiyotiklerin nanolif formuna entegrasyonu ve antimikrobiyal etkinliği araştırılmıştır. Bu bağlamda *Lactobacillus acidophilus* ve *Laactobacillus rhamnosus* suşlarından elde edilen postbiyotikler, polimer çözeltilerine karıştırılarak nanolif formuna dönüştürülmüştür. Postbiyotiklerin, FESEM tekniği ile morfolojik analizi yapılan nanoliflere dahil edildiği görüntülenmiştir. Ayrıca üretilen nanolif membranlar, 5 farklı patojen mikroorganizmaya karşı antimikrobiyal etkinliği araştırılmış ve iyi seviyede antimikrobiyal özellik sergiledikleri ortaya konmuştur.

6 Conclusions

With the advancement of nanotechnology, various nanofiber membranes with different properties have been developed, particularly over the past few decades. Nanofibers, characterized by their large surface area and high porosity, are well-suited for the integration of various bioactive agents and their subsequent release. Postbiotics are metabolites derived from microorganisms. Postbiotics obtained from bacteria that have been inactivated using various methods are safe for use

due to their lack of live cells and are not subject to the limitations imposed on probiotics. Numerous studies have demonstrated that postbiotics positively influence the host's physiological activities and overall health. Jamaran et al. (2021) utilized the solvent casting technique to produce a biodegradable postbiotic/chitosan/polyethylene glycol (PEG)-based film incorporating cell-free supernatant obtained from *Lactobacillus reuteri* and investigated its potential application as a wound dressing in animal experiments. The animal experiments were conducted by creating full-thickness excisional wounds on 45 male rats, which were then divided into three groups: a control group, a chitosan group, and a postbiotic group. Antimicrobial analysis and gene expression analysis were performed on the produced films. The findings revealed that the films containing postbiotics inhibited pathogens responsible for wound infections and exhibited antimicrobial properties [19].

In a study investigating the effects of postbiotics on wound healing, three different topical cold cream formulations containing postbiotics derived from various probiotic strains—*Lactobacillus fermentum*, *Lactobacillus reuteri*, and *Bacillus subtilis sp. natto*—were prepared and tested for their efficacy using a rat model. The postbiotic-containing creams were compared with a control group treated with a postbiotic-free cream and another group that received no treatment. The findings demonstrated that the postbiotic-containing formulations accelerated the healing process compared to the control group. Among the tested formulations, the cream containing *Bacillus subtilis natto* postbiotic exhibited the most effective wound healing properties. Hydroxyproline, a key indicator of tissue repair and collagen synthesis, was measured in the study. The formulation containing *Bacillus subtilis natto* postbiotic produced the highest hydroxyproline levels compared to the other formulations. To further evaluate wound healing, a histological analysis was conducted on day 14, assessing parameters such as epithelialization, inflammation, granulation, and fibrosis. Incomplete epithelialization was observed in rats treated with the postbiotic-free cold cream, the *Lactobacillus fermentum* postbiotic-containing cream, and the untreated group. In contrast, complete epithelialization was achieved in rats treated with creams formulated with postbiotics derived from *Lactobacillus reuteri* and *Bacillus subtilis sp. natto*. The degree of inflammation varied among the groups, with the highest levels observed in the untreated and postbiotic-free cold cream-treated groups, while no inflammation was detected in the group treated with *Lactobacillus reuteri* cold cream. Overall, the histological evaluation results demonstrated that postbiotic-containing cold creams effectively promoted wound healing [20].

In this study, the integration of postbiotics into nanofiber form and their antimicrobial efficacy were investigated using the electrospinning technique. In this context, postbiotics derived from *Lactobacillus acidophilus* and *Lactobacillus rhamnosus* strains were mixed with polymer solutions and converted into nanofiber form. The inclusion of postbiotics in the nanofibers was confirmed through morphological analysis using the FESEM technique. Additionally, the produced nanofiber membranes were evaluated for their antimicrobial activity against five different pathogenic microorganisms, and they exhibited significant antimicrobial properties.

7 Yazar katkı beyanı

Yapılan bu çalışmada Ahmet Koluman; fikrin oluşması ve yöntem tasarımında, Aleyna Sure Öztürk literatür taraması, deneylerin gerçekleştirilmesi ve makalenin düzenlenmesinde katkı sunmuşlardır.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur".

"Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır".

9 Kaynaklar

[1] Uğur E, Öner Z, Bektaş A, Ulusoy M. "Paraprobiyotikler, postbiyotikler ve sağlık üzerine etkileri". *Gıda*, 46(2), 428-442, 2021.

[2] Coghetto CC, Brinques GB, Ayub MAZ. "Probiotics production and alternative encapsulation methodologies to improve their viabilities under adverse environmental conditions". *International journal of food sciences and nutrition*, 67(8), 929-943, 2016.

[3] Cuevas-González PF, Liceaga, AM, Aguilar-Toalá, JE. "Postbiotics and paraprobiotics: From concepts to applications". *Food research international,* 136, 109502, 2020.

[4] Żółkiewicz J, Marzec A, Ruszczyński, M, Feleszko W, "Postbiotics-a step beyond pre-and probiotics". *Nutrients*, 12(8), 2189, 2020.

[5] Açar Y, Sökülmez Kaya P. "Postbiyotikler ve sağlık üzerine etkileri: sistematik derleme". *Literatür Eczacılık Bilimleri Dergisi*, 10(2), 276-284, 2021.

[6] Sharma V, Harjai K, Shukla G. "Effect of bacteriocin and exopolysaccharides isolated from probiotic on P. aeruginosa PAO1 biofilm". *Folia Microbiologica*, 63, 181-190, 2018.

[7] Yordshahi AS, Moradi M, Tajik H, Molaei R. "Design and preparation of antimicrobial meat wrapping nanopaper with bacterial cellulose and postbiotics of lactic acid bacteria". *International Journal of Food Microbiology*, 321, 108561, 2020.

[8] Zhang Y, Lim CT, Ramakrishna S, Huang ZM "Recent development of polymer nanofibers for biomedical and biotechnological applications". *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 16, 933-946, 2005.

[9] Rošic R, Kocbek P, Pelipenko J, Kristl J, Baumgartner S. "Nanofibers and their biomedical use". *Acta Pharmaceutica*, 63(3), 295-304, 2013.

[10] Coşkun Üstündağ G. Elektrospinning Yöntemi ile Biyomedikal Kullanıma Yönelik Nanolif Yüzey Üretimi ve Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye, 2009.

[11] Machado PA, Fraga GN, Medeiros AR, Pellá MC, Colauto NB, Linde GA, Cavalheiro FN, Faria MGI, Dragunski DC, Caetano J. "Poly (vinyl alcohol)-Based electrospun nanofibers with ımproved antimicrobial activity". *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 34, 1852-1862, 2023.

[12] Kesici Güler H, Cengiz Çallıoğlu F, Sesli Çetin E. "Antibacterial PVP/cinnamon essential oil nanofibers by emulsion electrospinning". *The journal of the Textile Institute*, 110(2), 302-310, 2019.

[13] Shankhwar N, Kumar M, Mandal BB, Robi PS, Srinivasan A. "Electrospun polyvinyl alcohol-polyvinyl pyrrolidone nanofibrous membranes for interactive wound dressing application". *Journal of Biomaterials science, Polymer edition*, 27(3), 247-262, 2016.

[14] Pala N, Aral N, Nergıs B. "Emulsion electrospinning of PVA nanofibers containing hypericum perforatum oil". *Tekstil ve Mühendis*, 29(128), 267-271, 2022.

[15] Koosha M, Mirzadeh H. "Electrospinning, mechanical properties, and cell behavior study of chitosan/PVA nanofibers". *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 103(9), 3081-3093, 2015.

[16] Yang D, Li Y, Nie J. "Preparation of gelatin/PVA nanofibers and their potential application in controlled release of drugs". *Carbohydrate Polymers*, 69(3), 538-543, 2007.

[17] Ekrami E, Mahmoudifard M, Shahraky MK. "Lactosporin loaded electrospun nanofibrous membrane: Novel antibacterial and wound dressing patch". *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 96, 105635, 2024.

[18] Al-Malkey MK, Ismeeal MC, Al-Hur FJA, Mohammed SW, Nayyef HJ. "Antimicrobial effect of probiotic *Lactobacillus* spp. on *Pseudomonas aeruginosa*". *Journal of Contemporary Medical Sciences*, 3(10), 218-223, 2017.

[19] Jamaran S, Jafari P, Marjani A, Akbari N, Feizabad, MM. "Novel wound dressing based on postbiotic/chitosan film accelerates cutaneous wound healing". *Jundishapur Journal of Microbiology*, 14(12), 1-13, 2021.

[20] Golkar N, Ashoori Y, Heidari R, Omidifar N, Abootalebi SN, Mohkam M, Gholami A. "A novel effective formulation of bioactive compounds for wound healing: preparation, in vivo characterization, and comparison of various postbiotics cold creams in a rat model". *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2021, 1-13, 2021.

Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 31(7), 1335-1343, 2025

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Upgraded bio-oil production with catalytic co-pyrolysis of spruce sawdust

Ladin talaşının katalitik kopiroliziyle geliştirilmiş biyo-yağ üretimi

Ahmet Rasim Girişen[1], *Hakan Özcan*[1*]

[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ondokuz Mayis University, Samsun, Türkiye.
ahmetrasimgirisen@gmail.com, ozcanh@omu.edu.tr

Received/Geliş Tarihi: 06.09.2024 Revision/Düzeltme Tarihi: 19.12.2024 doi: 10.5505/pajes.2025.01679
Accepted/Kabul Tarihi: 25.03.2025 Research Article/Araştırma Makalesi

Abstract

This paper aimed to upgrade the bio-oils with the catalytic co-pyrolysis of spruce sawdust. A bubble-fluidized bed pyrolysis reactor was used in the experiments. The effects of the different mixing ratios of spruce sawdust with glycerol (10, 20, and 30 wt%), the usage of different catalysts (HZSM-5 and dolomite), and pyrolysis temperatures (400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C and 600 °C) on the yields and quality of obtained bio-oils were examined. The experimental results revealed that the bio-oil yield improved with an additive of glycerol at all mixing ratios. The highest bio-oil yield (46.4 wt%) was received at a 20 wt% mixing ratio of glycerol and a pyrolysis temperature of 550 °C with a dolomite catalyst. The results of GC-MS indicated that the pyrolysis oil included a high proportion of ketones, phenols, and alcohols, which supported the potential of the catalytic co-pyrolysis of spruce sawdust with glycerol for bio-oil upgrading. The pyrolysis oil from spruce sawdust pyrolysis consisted of a ratio of 4.81% (GC-MS peak area) of unoxygenated hydrocarbons. Furthermore, the unoxygenated components were found to be 8.02% in the bio-oil produced by co-pyrolysis with glycerol. The number of unoxygenated hydrocarbons increased significantly during ex-situ catalytic co-pyrolysis. The unoxygenated hydrocarbons in the bio-oils produced by catalytic co-pyrolysis with HZSM-5 and dolomite were found to be 19.10% and 22.24%, respectively. The co-pyrolysis and catalytic co-pyrolysis results also revealed that the average carbon number of the compounds in the bio-oils depends on the chosen methods and catalysts. Using the catalyst in the reactor resulted in the formation of low-carbon number hydrocarbons. However, when used outside the reactor, the catalysts were observed to be more effective for deoxygenation.

Keywords: Catalytic co-pyrolysis, Biomass, Glycerol, HZSM-5, Dolomite.

Öz

Bu makale, ladin talaşının katalitik ko-pirolizi ile biyo-yağların yükseltilmesini amaçlamaktadır. Deneylerde kabarcıklı akışkan yataklı piroliz reaktörü kullanılmıştır. Ladin talaşının gliserol ile farklı karıştırma oranlarının (%10, 20 ve 30 ağırlık), farklı katalizörlerin (HZSM-5 ve dolomit) kullanımının ve piroliz sıcaklıklarının (400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C ve 600 °C) elde edilen biyo-yağların verimi ve kalitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, biyo-yağ veriminin tüm karıştırma oranlarında gliserol katkı maddesiyle arttığını ortaya koymuştur. En yüksek biyo-yağ verimi (%46.4 ağırlıkça), %20 gliserol karıştırma oranında ve dolomit katalizörüyle 550 °C'lik bir piroliz sıcaklığında elde edilmiştir. GC-MS sonuçları, piroliz yağının yüksek oranda keton, fenol ve alkol içerdiğini göstermiştir; bu da biyo-yağ iyileştirmesi için gliserol ile ladin talaşının katalitik eş-pirolizinin potansiyelini desteklemektedir. Ladin talaşı pirolizinden elde edilen piroliz yağı, %4.81 oranında (GC-MS pik alanı) oksijensiz hidrokarbonlardan oluşmuştur. Ayrıca, gliserol ile eş-pirolizle üretilen biyo-yağda oksijensiz bileşenlerin %8.02 olduğu bulunmuştur. Ex-situ katalitik eş-piroliz sırasında oksijensiz hidrokarbonların sayısı önemli ölçüde arttı. HZSM-5 ve dolomit ile katalitik eş-pirolizle üretilen biyo-yağlardaki oksijensiz hidrokarbonların sırasıyla %19.10 ve %22.24 olduğu bulundu. Eş-piroliz ve katalitik eş-piroliz sonuçları ayrıca biyo-yağlardaki bileşiklerin ortalama karbon sayısının seçilen yöntem ve katalizörlere bağlı olduğunu ortaya koydu. Reaktörde katalizörün kullanılması düşük karbon sayılı hidrokarbonların oluşumuyla sonuçlandı. Ancak katalizörlerin reaktör dışında kullanıldığında oksijensizleştirme için daha etkili olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Katalitik kopiroliz, Biyokütle, Gliserol, HZSM-5, Dolomit.

1 Introduction

It is essential to meet the energy needs of the increasing population with clean and renewable energy sources. Energy consumption and environmental pollution are increasing because of the rise in human population. Therefore, just meeting the energy demand is not enough. Clean, sustainable energy resources that meet the increasing need should be created [1]-[3]. Bioenergy is promising as an alternative to clean and renewable energy. Bioenergy is valuable because it is renewable, meets multiple needs, and does not harm the environment during production. It is essential to balance the carbon footprint created by the increasing population by recycling waste biomass. [4],[5].

The fact that biomass to be chosen as an energy source serves more than one purpose makes this resource valuable. In addition, there are some disadvantages to chemicals and fuels obtained from biomass. Biomass has a complex structure and high oxygen content, which makes it difficult to control chemical reactions and maintain product quality. Problems such as high acidity, high oxygen content, and low calorific value are encountered in fuels obtained from biomass [6],[7]. However, when considered an energy source, its abundance, easy production, cleanliness, and cheapness make it attractive for research on this subject [8]. There are many different ways to obtain energy from biomass. Some of them are hydrolysis, biophotolysis, pyrolysis, fermentation, combustion, and gasification [9]. Among the various biomass conversion technologies, pyrolysis has garnered substantial interest. Hydrolysis can transform Organic compounds into valuable products such as bio-oil, biochar, and biogas. A diverse array of feedstocks, including agricultural residues, forestry by-products, and dedicated energy crops, can be utilized for pyrolysis.

*Corresponding author/Yazışılan Yazar

The main product, bio-oil formed due to pyrolysis, has yield values that can reach up to 70% by weight, depending on various factors (reactor operating conditions, holding time, biomass properties, etc.) [10]. Most fossil fuels are considered gasoline, diesel, aviation, and jet fuel in the transportation sector. Crude bio-oil obtained through pyrolysis has properties such as high viscosity, acidity, and chemical instability that make it unsuitable for use as fuel. For this reason, bio-oil properties need to be improved for direct use. One obstacle to using bio-oils as a renewable alternative to fossil fuels is their significantly high oxygen content of approximately 50% by weight. Pyrolysis oil is a complex structure consisting of various oxygenated components such as ketones, aldehydes, phenols, and sugars. The possibilities of using methods used in oil refining processes to obtain high-value-added petroleum products from bio-oil are also being investigated. However, it has disadvantages in fluidized bed pyrolysis and hydrothermal processes. When large quantities of bio-oil are directly processed using fluidized bed pyrolysis, a high amount of coke is formed, decreasing liquid yield. Studies on hydrothermal processes with bio-oil can provide higher degrees of deoxygenation than studies conducted with fluidized beds. In addition, hydrogen creating high partial pressure has increased process costs [11].

Many studies have been carried out on pyrolysis and co-pyrolysis [12]-[14]. Moreover, co-pyrolysis or catalytic pyrolysis methods have been used to reduce the oxygen content and decrease the C/H ratio of pyrolysis oil. The purpose of co-pyrolysis or catalytic pyrolysis is to remove the oxygen contained in the bio-oil by converting it into CO_2, CO, etc. gases or to ensure that the carbons in the structure bind excess Hydrogen. Rotliwala and Parikh studied the co-pyrolysis of high-density polyethylene (HDPE) with defatted Jatropha cake (JK) in a batch reactor. The co-pyrolysis process was carried out in nitrogen flow at atmospheric pressure and a temperature of 450 °C. The bio-oil yield obtained from co-pyrolysis was determined to be 63%. Bio-oils obtained from co-pyrolysis were examined using analysis of GC-MS and ASTM D86 standards. The co-pyrolysis of HDPE with JK significantly increased the proportion of components with a gasoline-like carbon range (C6-C12) by up to 45% compared to when HDPE was pyrolyzed alone [15]. Solak et al. obtained the highest bio-oil yield of 79.5% from the co-pyrolysis of cellulose and polyethylene at 500 °C [16],[17]. Brebu et al. investigated the pyrolysis of lignin with polymers such as PE, PP, PS, and PC [18], [19]. He stated that the liquid yield obtained only reached 53.2-62.7% by weight. In addition, they reported that they co-pyrolyzed pine cones with synthetic polymers and found that they gave a liquid yield of 63.9-69.7% by weight. When biodiesel is produced by transesterification of grease, glycerin is released as a significant by-product. Mihalcik et al. utilized pyrolysis coupled with gas chromatography-mass spectrometry (Py/GC-MS) to investigate the catalytic fast pyrolysis of lignocellulosic biomass, including oak, corn cob, corn stover, and switchgrass, along with the primary biomass components: cellulose, hemicellulose, and lignin [20]. The various catalysts were tested in their study. The HZSM-5 exhibited the highest efficiency in producing aromatic hydrocarbons from the pyrolytic vapors.

Pan et al. investigated the catalytic pyrolysis of Nannochloropsis sp. (a green microalgae residue) with an HZSM-5 catalyst in a fixed-bed reactor [21]. Their findings revealed that the bio-oil obtained via pyrolysis had an oxygen content of 30.1wt% and a heating value of 24.6 MJ/kg. The bio-oil produced via catalytic pyrolysis had a significantly lower oxygen content (19.5 wt%) and a higher heating value (32.7 MJ/kg) than the bio-oil from non-catalytic pyrolysis. Bio-oil from direct pyrolysis primarily consists of long-chain carbon compounds. On the other hand, the bio-oil obtained via catalytic pyrolysis products were predominantly aromatic hydrocarbons.

The boiling point of glycerol is 290 °C, and when higher temperatures are reached in pyrolysis, components such as CO, H_2, CO_2, CH_4, etc. are formed. In this case, Glycerol becomes a usable material in co-pyrolysis for hydrogen enrichment and deoxygenation. Carmines et al. analyzed by adding different amounts of glycerol (5%, 10%, and 15%) to tobacco and collecting the products of pyrolysis and particulate matter from the pyrolysis gas during the co-pyrolysis of the mixture [22]. The results showed that glycerol diluted the smoke and increased the humidity. They also found that co-pyrolysis of tobacco with 10% and 15% glycerol increased acrolein content in the smoke. Nicotine, aromatic amine, acetaldehyde, propanol, phenols, N-nitrosamines, and other compounds have also been shown to be reduced. Skoulou et al. prepared hydrogen-enriched fuel via co-pyrolysis using glycerin and olive stone in their study [23]. They revealed that the hydrogen content in the gas obtained from pyrolysis increased by 11.6% in the mixture of olive stone with 25% glycerol.

This study aims to investigate the catalytic co-pyrolysis of spruce sawdust and glycerol with HZSM-5 and dolomite. It also seeks to elucidate the synergistic effects of glycerol on the co-pyrolysis with woody biomass. In this context, direct and catalytic fast pyrolysis of spruce sawdust was examined by a fluidized bed reactor at different temperatures between 400 °C and 600 °C. in experimental studies, HZSM-5 was used as a commercial catalyst, and dolomite was chosen as a natural catalyst. Catalytic co-pyrolysis trials were conducted as in-situ and ex-situ. TGA and elemental analyses of spruce sawdust were performed. GC-MS and FT-IR analyses were performed to examine the quality of bio-oil. The yields of the products obtained from the pyrolysis process performed at 3 different temperatures were compared. The effect of the catalyst on the obtained bio-oil was examined.

2 Material and method

2.1 Materials

Furniture manufacturers operating in Samsun province of Turkey supplied spruce sawdust used in experimental studies. The spruce sawdust was sieved to be 0.75-1.2 mm. The drying process was carried out by keeping it in an oven at 75 °C for 12 hours. Vario Cube Elemental Analyzer was used for elemental analyses. Muffle and convection furnaces performed a proximate analysis of spruce sawdust samples. The samples were air-dried at 105 °C by the ASTM E871-92 Standard and waited in the oven until they reached a constant weight. The samples placed in the lidded porcelain container were heated in a muffle furnace at 850 °C for 70 minutes. After the process, the remaining samples were cooled, and their weights were measured. For ash determination according to the ASTM D1102-84 standard, the samples were heated in lidless porcelain containers at 950 °C for 2 hours. The amount of fixed carbon was calculated by subtracting the sum of the resulting ash, moisture, and volatile substances from the initial mass. Glycerol (99.7%) used in the studies was purchased by

Beyanlab Laboratory Products Industry Trade Limited Company. Glycerol was mechanically mixed with spruce sawdust at 10 wt%, 15 wt%, and 20 wt%.

2.2 Catalyst

The dolomite catalyst was provided by Ataman Chemicals. It was then ground and passed through an 80-mesh sieve. The dolomite with the appropriate size was taken in an oven for drying at 105 °C for 18 hours. The surface area of the dolomite catalyst as a result of Brunauer-Emmett-Teller (BET) analysis was determined as 3.975 m^2/g. The HZSM-5 catalyst was supplied by ACS Material. In the study of the catalyst made by the seller, the SiO_2/Al_2O_2 molar ratio was stated as 26. Crystal size, H_2O, and BET surface area values of HZSM-5 were specified as 800 nm, <5 wt%, and 362 m^2/g, respectively. Catalysts were used in ex-situ experiments as 4 g to ensure that the pyrolysis vapor passing through the metal container wholly passed through the catalyst. In the in-situ experiments, 4 g was added to raw materials with a total weight of 40 g and mixed to form a homogeneous mixture.

2.3 Thermogravimetric analysis (TGA)

TA Instruments SDTQ600 device was used in thermogravimetric analysis to determine the thermal behavior of spruce sawdust and temperature-dependent mass losses. The sample mass for the experiment was 2 mg. The initial temperature of experiments was set at room temperature. In analyses performed up to 800 °C, the heating rate was set as 10 °C /min. Nitrogen gas flow was set at 50 ml/min as a carrier gas, providing an inert atmosphere in the analyses. Furthermore, TGA analysis was performed twice to minimize the experimental error.

2.4 Characterization of bio-oil

The molecular bonds in the pyrolysis oil produced from spruce sawdust were identified via FTIR analysis. Bruker Tensor 27 IR analyzer, which measures in the range of 400-4000 cm^{-1}, was used in the analyses. Gas Chromatography-Mass Spectrometry analysis was performed using the Shimadzu GCMS-QP2020 plus device to determine the compounds contained in the bio-oil. The bio-oils to be analyzed were diluted with Methanol at the HPLC level at a ratio of 1/100 by volume. 2 µl of the sample was used for each injection. Restek Rxi-5ms (30 m x 0.25 mm, 0.25 µm Film thickness) column was used in GC-MS analyses. Helium was used as a carrier gas in the sample analysis, and the injector temperature was determined as 250 °C; the program was adjusted to start from 50 °C, reach 280 °C at a speed of 10 °C /min, and wait for 1 minute at 280 °C.

2.5 Experimental setup

The experimental system established to obtain bio-oil from spruce sawdusts by pyrolysis is given in Figure 1. The raw material was fed into the bubble-fluidized bed pyrolysis reactor from the top at a constant rate of 0.1 g/s into the reaction zone. The reactor, which had an inner diameter of 50 mm and a length of 400 mm, was heated only with electrical heaters. Nitrogen (N) gas was used to carrier gas and provide an inert environment during the experiments. Nitrogen gas was connected to the reactor from the bottom, and the flow was provided at a constant flow rate of 100 ml/min (the flow rate was standardized for 0 °C and 1 atm conditions). Temperatures were measured with 7 thermocouples inside and outside the reactor. Silica sand was used as the bedding material in all experimental studies carried out at different temperatures. Pyrolysis was performed with 40 g of sample in each experimental set. The reactor's gases were passed through the condenser at 0 °C. A second cooler and, finally, a gas washing chamber were used to increase the condensation of the gases. Since the amount of usable, helpful liquid was prioritized when calculating the total liquid yield, the liquid products in the glass containers were weighed to determine the total mass. The obtained products were filtered using filter paper and separated from solid particles.

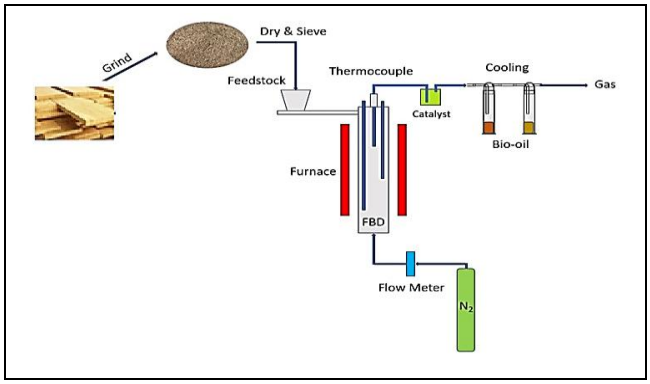


Figure 1. Schematic view of the pyrolysis system.

3 Results

The sample homogeneity was ensured to avoid errors related to particle size during the thermal and experimental analysis of spruce sawdust. Proximate and ultimate analyses are crucial for controlling and understanding the pyrolysis reactions because of the complex structure of woody biomass. These analysis results are shown in Table 1. The fixed carbon, ash, moisture, and volatile matter contents of the spruce sawdust were found to be 19.96 wt%, 5.49 wt%, 9.99 wt%, and 75.54 wt%, respectively. Excessive humidity may cause adverse effects such as high heat requirement for evaporation [24]. It is seen that the hydrogen, carbon, oxygen, and nitrogen contents of spruce sawdusts are 6.07 wt%, 50.44 wt%, 43.19 wt%, and 0.3 wt%, respectively. It can be seen that spruce sawdust alone cannot provide the desired H/C ratio to obtain diesel fuel-like bio-oil. In addition, the high oxygen content indicates that the pyrolysis oil will be rich in oxygen and might contain acid, alcohol, and ketone-like structures. For this reason, bio-oil should be enriched with hydrogen and oxygen removed. It is known that the quality of pyrolysis oil increases, its calorific value increases, and its oxygen content decreases thanks to co-pyrolysis [25]-[28]. Compared to enriching bio-oils with hydrogen at high pressure, co-pyrolysis is a safer and easier way to produce quality bio-oil [13],[29]-[31].

Table 1. Proximate and ultimate analysis of spruce sawdust.

	Compound	wt%
Ultimate analysis	C	50.44
	H	6.07
	N	0.3
	O	43.19
Proximate analysis	Fixed Carbon	19.96
	Moisture	9.99
	Volatiles	75.54
	Ash	5.49

The curves obtained from thermogravimetric analysis applied to spruce sawdust are presented in Figure 2.

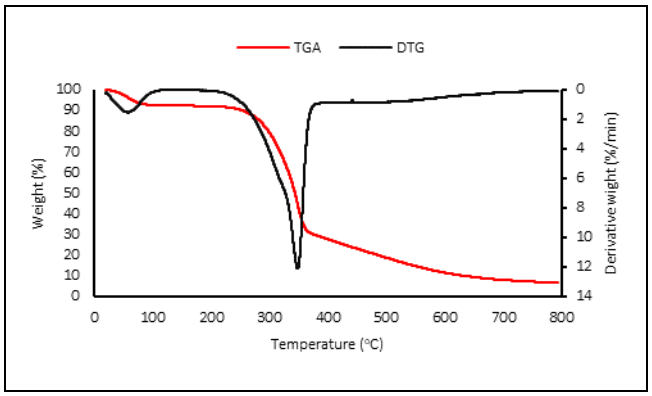


Figure 2. TGA and DTG curves of spruce sawdust.

The mass loss started with the increase in temperature and gave the first peak at approximately 63 °C. As a result of the evaporation of moisture at temperatures up to 207 °C, the spruce saw dust lose approximately 9% mass. Subsequently, with the increase in temperature, the decomposition of hemicellulose began rapidly. It reached its maximum mass loss rate at 345 °C, where hemicellulose and cellulose decompose. At 390 °C, where the curve started to become linear, the total mass loss was observed to be 70%. When the temperature reached 500°C, the passive pyrolysis zone was entered. The lignin degrades slowly in this region [32].

In the pyrolysis of spruce sawdust carried out at different temperatures, the highest liquid product yield was obtained at 550 °C. While the temperature increased the liquid and gas product yield, it caused the biochar yield to decrease. Heating rates were kept constant for all temperatures. In addition, feed rates and carrier gas flow rates were kept constant. It was not expected to see a difference at the desired level in product conversion when increasing the temperature above 600 °C. For this reason, this temperature was not exceeded. The pyrolysis product yields of spruce sawdust at different temperatures are given in Figure 3.

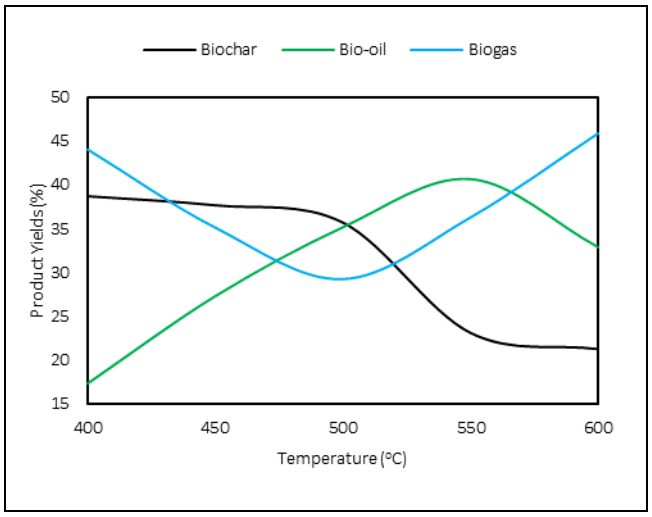


Figure 3. Product yields in pyrolysis of spruce saw dusts at different temperatures.

In pyrolysis at 400 °C, the product yields of bio-oil, bio-char, and biogas were determined as 17.32 wt%, 38.69 wt%, and 43.99 wt%, respectively. The biochar, bio-oil, and biogas yields in pyrolysis at 600 °C were obtained as 21.28 wt%, 32.89 wt%, and 45.83 wt%, respectively. The pyrolysis oil yield increased significantly at 550 °C temperature, and the highest pyrolysis oil yield was obtained at 40.66 wt%. The co-pyrolysis and catalytic co-pyrolysis experiments were conducted at 550 °C temperature because the highest bio-oil yield of pyrolysis was obtained at this temperature. Co-pyrolysis is a well-known method to improve bio-oil quality obtained from pyrolysis [22],[23],[28],[33]. In co-pyrolysis, choosing materials that are compatible with each other and will create a synergistic effect is important. Co-pyrolysis with glycerol was evaluated to obtain high-quality bio-oil from spruce sawdust. It is known in many studies that glycerol has positive effects on bio-oil. Three different mixture ratios were used in the experiments with glycerol. The yields of the products obtained from the co-pyrolysis of spruce sawdust with glycerol at different rates are given in Figure 4.

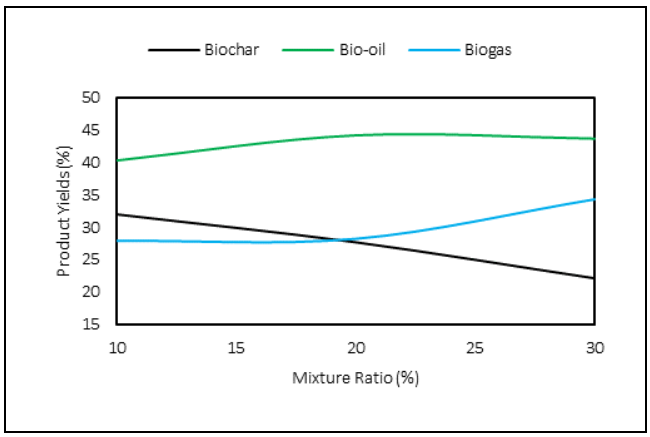


Figure 4. Product yields in co-pyrolysis of spruce saw dusts with glycerol at different mixing ratios.

When the liquid product amounts obtained from each mixture ratio were evaluated, it was seen that the 20% mixture amount gave the highest liquid yield. The liquid product yields obtained for 10 wt%, 20 wt%, and 30 wt% mixing ratios at 550 °C are 40.17 wt%, 44.11 wt%, and 43.59 wt%, respectively. Biochar yield decreased with increasing mixing ratio. It was observed that more liquid and gaseous products were formed with the increase in the mixing ratio. The results of co-pyrolysis revealed that the glycerol positively impacted the formation of both liquid and gaseous products in the co-pyrolysis reactions. However, increasing the rate of glycerol, the second component of co-pyrolysis, can enhance the conversion to gas product. In addition, it might evaporate before the pyrolysis and condense in the condensation zone. The experimental studies focused on the highest liquid product yield. The experiments of catalytic co-pyrolysis were conducted with a 20 wt% glycerol mixing ratio.

The HZSM-5 catalyst was used as an acidic and commercial catalyst. The dolomite catalyst was used as an alkaline and natural catalyst. Catalytic co-pyrolysis experiments were carried out in two stages: in-situ and ex-situ. The catalysts were mixed with the raw material in the in-situ catalytic co-pyrolysis of spruce sawdust mixed with glycerol. In ex-situ experiments, the pyrolysis vapor exiting the reactor was passed through a metal enclosed, including the catalyst. The yields of the products obtained from catalytic co-pyrolysis experiments are given in Figure 5. In all experiments, bio-char yields decreased

in co-pyrolysis experiments using the HZSM-5 catalyst. Biogas yields increased with HZSM-5. The structure of the catalyst used for pyrolysis generally affects product yields slightly.

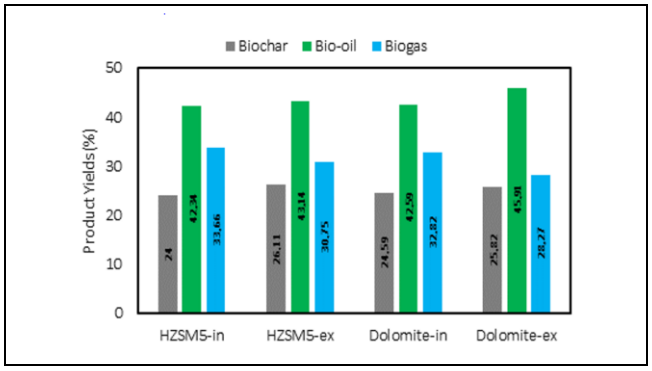


Figure 5. Product yields in co-pyrolysis of spruce sawdust and glycerol (20 wt.%) with different catalysts.

However, when acidic zeolitic catalysts are used, the chemical composition of the bio-oil may differ considerably [8]. The HZSM-5 catalyst reduced the amount of biochar with in-situ experiments compared to ex-situ experiments. However, the HZSM-5 showed greater efficiency and raised the gas product yield in ex-situ experiments. The HZSM-5 catalyst is less effective when used in the reactor, which may be caused by the temperature triggering irreversible deactivation or by contamination of the catalyst that limits its effectiveness [33]-[36]. The catalyst can be used for a long time and remains clear at ex-situ catalytic pyrolysis [37]-[39].

The dolomite catalyst increased biochar yields with in-situ experiments. However, the dolomite catalyst slightly increased the liquid product yield with ex-situ experiments. The dolomite catalyst decreased biogas yields in both situations. In addition, bio-oil yield decreased by 1.52% with in-situ experiments. A dolomite catalyst is often used to gasify biomass. Dolomite usually contains calcium and magnesium. Due to dolomite structure, it reduces tar production by breaking down and re-forming high molecular weight components and increases the amount of gas products [40],[41]. The dolomite catalyst increased the gas product yield in both cases. The dolomite used was not subjected to the calcination process. It was observed that the gas product yield of some independently calcined dolomite was increased [42]-[44]. Calcined dolomite consists of mixtures of CaO and MgO. MgO reduces the acid composition of bio-oil and promotes ketonization [45]. CaO catalyzes decarboxylation reactions and increases hydrocarbon formation [46]. In the experiments, partial calcination of the dolomite used in the reactor with the rising temperature may have caused the liquid product yield to increase while the gas product yield to decrease. The curves obtained from the FTIR analysis performed to determine the functional groups of the components in bio-oils are given in Figure 6. Since a diesel-like bio-oil is targeted, oxygen-containing compounds should not be in the liquid product. However, when the curves for all cases were examined, the peaks between the wavelengths of 3200-3700 cm^{-1}, which showed O-H stretching vibrations, showed that there were oxygen-bonded compounds in all the bio-oils. It appears that there are a lot of oxygenated components in the bio-oil obtained with the pyrolysis of spruce sawdust.

The co-pyrolysis results with catalysts showed that oxygen-containing components decreased. It can be said that O-H bonded carboxylic acid and alcohol structures exist in bio-oils. C-H stretching vibrations in the band gap of 2695-3333 cm^{-1} and C-H bending vibrations in the band gap of 1350-1475 cm^{-1} showed the presence of alkane and aldehyde structures in the bio-oil. Similar peaks at a wavelength of 1700 cm^{-1} in all structures indicated C-O bonds, indicating the presence of ketones, carboxylic acids, and aldehydes in the bio-oils. In addition, C-O stretching vibrations between 950-1300 cm^{-1} showed that alcohol and ester structures may be among the compounds [47],[48].

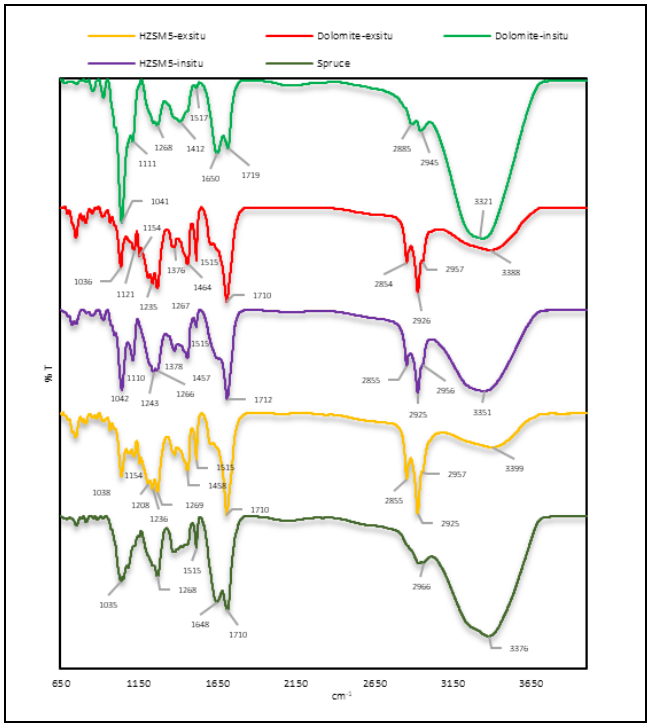


Figure 6. FTIR curves of bio-oil obtained from catalytic co-pyrolysis with HZSM-5 and dolomite.

Catalysts such as HZSM-5 and dolomite enhance decarboxylation and decarbonylation reactions, facilitating the conversion of oxygenated compounds in biomass into gases such as carbon dioxide (CO_2) and carbon monoxide (CO). These processes significantly contribute to the reduction of oxygen content in bio-oil. The strong acidic structure of HZSM-5 promotes the decomposition of oxygenated compounds, enabling the removal of oxygen atoms from hydrocarbon chains. These oxygen atoms are subsequently converted into water (H_2O) or other volatile oxygenated compounds, decreasing the residual oxygen content in the bio-oil. Additionally, the high aromatization capacity of HZSM-5 facilitates the breakdown of oxygenated compounds, leading to the formation of more stable, low-oxygen aromatic hydrocarbons [49]. As a dual-function catalyst, Dolomite exhibits both acidic and basic properties, enabling the selective removal of oxygenated compounds. Furthermore, dolomite's ability to capture carbon dioxide contributes indirectly to reducing oxygen content in the bio-oil [50].

GC-MS analysis was performed to get specific results about the contents of the bio-oils obtained from the experiments. The data obtained from the GC-MS are given in Table 2 for the best results. The commentary about FTIR analysis results was confirmed by GC-MS results. The bio-oil obtained from the pyrolysis of spruce sawdust contained mainly oxygenated hydrocarbons.

Table 2. GC-MS results of pyrolysis oils produced from catalytic co-pyrolysis.

	Spruce		***HZSM5-exsitu***		***Dolomite-exsitu***	
Peak	Area%	Name	Area%	Name	Area%	Name
1	2.39	Glycerol	1.27	2,2-	0.35	N-Propyl
2	4.81	N-Methyl-N-(Methyl-	1.84	Furfural	1.77	2,2-
3	0.78	1-Hydroxy-2-Butanone	0.86	Furfuryl	1.91	Furfural
4	0.83	Methyl Pyruvate	0.50	1,2-Epoxy-3-	1.01	Furfuryl
5	6.28	Furfural	0.71	2-Methyl-2-	0.75	2-Methyl-2-
6	4.52	Furfuryl Alcohol	0.50	5-Methyl-2-	0.55	2-
7	1.37	1,2-Epoxy-3-Propyl	1.07	4-Methyl-5h-	0.92	Xylose
8	1.20	2-Methyl-2-	0.54	Phenol	0.64	Phenol
9	0.88	1-(3h-Imıdazol-4-Yl)-	2.23	1,2-	0.55	N-Tetradecane
10	1.72	2(5h)-Furanone	0.51	2,3-Dimethyl-	2.10	Corylon
11	3.07	1,2-Cyclopentanedıone	1.45	O-Cresol	0.57	2,3-Dimethyl-
12	0.62	N-Propyl Acetate	0.87	N-	2.65	O-Cresol
13	1.68	5-Methyl-2-Furfural	2.52	O-Cresol	2.65	Phenol, 2-
14	0.85	4-Methyl-5h-Furan-2-One	4.36	Mequinol	4.63	Mequinol
15	0.61	Phenol	2.83	1-Acetoxy-2,3-	3.44	1-Acetoxy-2,3-
16	1.09	2,2-Diethyl-3-	0.44	Dodecane, 4,6-	0.56	Dodecane, 4,6-
17	4.05	Corylon	0.51	3-Ethyl-2-	0.93	3,5-Xylenol
18	1.19		1.35	Phenol, 2,6-	0.79	P-
19	0.74	O-Cresol	1.13	Pentylbenzene	1.17	Benzene,
20	0.83	M-Cresol	0.72	P-	1.02	P-
21	0.53	4-Hydroxy-2,5-Dımethyl-3(2h)-Furanone	1.15	Octanoic Acid	0.49	Caprylic Acid
22	5.83	Guaiacol	10.64	2-Methoxy-4-	1.17	M-Cresol, 2-
23	0.91	Maltol	0.93	Pyrocatechol	11.01	2-Methoxy-4-
24	0.56	2-Cyclopenten-1-One, 3-	0.74	2,3-	0.90	Nonane, 3-
25	0.58	2,2'-Bioxepane	2.46	Bıcyclo[6.4.0]D	2.07	Bıcyclo[6.4.0]D
26	0.69	Carvomenthol	1.28	Nonoic Acid	1.23	Satın Aldehyde
27	8.61	Phenol, 4-Methoxy-3-	6.86	Phenol, 4-	6.69	Guaiacol <4-
28	0.56	Butyrıc Acıd, 1-	0.59	1,2-	3.16	Phenol, 4-
29	2.89	Pyrocatechol	3.87	Phenol, 4-	1.16	M-XHQ
30	1.11	Ethyl	1.54	1,4-	2.35	Eugenol
31	4.11	HMF	2.67	Eugenol	1.79	1-
32	0.60	2-(2-Hydroxy-2-P-	1.90	1-	2.61	Eugenol
33	1.24	1,2-Benzenediol, 3-	2.74	Euganol	0.44	Cyclotetradeca
34	3.11	Guaiacol <4-Ethyl->	0.89	M-Cresol, 2-	1.06	Isoeugenol
35	1.54	1,2-Benzenediol, 3-	1.25	3-Allyl-6-	7.89	Isoeugenol
36	1.72	Guaiacol <4-Vinyl->	9.34	Isoeugenol	0.48	1-Phenyloctane
37	0.59	M-XHQ	1.72	Heptadecane	2.47	N-Hexadecane
38	1.08	Eugenol	0.72	2-Propanone,	0.63	Heneicosane
39	0.81	4-Ethylresorcinol	0.51	Benzene,	0.55	5-Heptadecene,
40	1.14	Vanillin	0.87	Benzeneacetic	2.93	9-Eicosene,
41	0.55	Eugenol	0.92	5-Heptadecene,	3.19	9-Octadecene,
42	5.17	1,6-Anhydro-Beta-D-	3.36	9-Eicosene,	2.62	N-Hexadecane
43	4.52	Isoeugenol	2.86	9-Eicosene,	1.23	2-
44	0.66	Eugenol	1.88	N-Hexadecane	0.66	2-

Table 2. Continued.

	Spruce		*HZSM5-exsitu*		*Dolomite-exsitu*	
45	1.44	Acetovanillone	1.05	4-PHENYL-4-	0.54	2.3-
46	2.45	2-Propanone, 1-(4-	2.37	Methyl	2.61	Methyl
47	2.30	Heptyl Acetate	1.56	ALLYL	1.14	ALLYL
48	0.92	N-(5-Oxo-Tetrahydro-	1.50	9.12-	1.24	9.12-
49	2.57	Methyl-(2-Hydoxy-3-	4.81	Methyl Oleate	4.49	Methyl Oleate
50	1.69	3-(P-Hydroxy-M-	0.83	Methyl Oleate	2.25	Methyl Cis-7-

The broad O-H peak seen in the FTIR analysis supported this situation. The GC-MS results revealed that furan, aldehyde, alcohol, and phenol compounds comprised the majority. The number of oxygen-free hydrocarbons was determined as 4.81% (peak area). Benzene, alcohol, and aliphatic hydrocarbons were primarily seen in bio-oil obtained from co-pyrolysis. The oxygen-free hydrocarbons increased with glycerol at 8.02%. Although the increase is significant, it is not sufficient for use as a diesel fuel. The oxygen-free hydrocarbons peak areas in the pyrolysis oils produced from catalytic co-pyrolysis experiments were determined as 8.46%, 19.10%, 10.28% and 22.24% for HZSM5-insitu, HZSM5-exsitu, dolomite-insitu and dolomite-exsitu, respectively. The highest amount of aliphatic hydrocarbon was observed in the co-pyrolysis of dolomite-exsitu. The highest deoxygenation was obtained using a dolomite catalyst compared to other catalytic co-pyrolysis experiments. With many features of the HZSM-5 catalyst, such as its three-dimensional pore structure, acidic characteristics, and ion exchange capacity, reduces the number of oxygenated components. It causes an increase in the number of aromatic hydrocarbons [8].

The bio-oil compounds derived from spruce pyrolysis exhibit shorter carbon chains than those obtained through catalytic co-pyrolysis. The average carbon chain length was calculated based on the composition of the bio-oils. The average carbon chain lengths for spruce, HZSM5-ex situ, and dolomite-ex situ bio-oils were 7.12, 10.76, and 10.98, respectively, indicating that HZSM-5 and dolomite catalysts facilitated the formation of longer carbon chains. The carbon chain distributions in the bio-oils were compared to the carbon ranges of fossil fuels. The carbon ranges for diesel, kerosene, and gasoline were determined as C_8–C_{21}, C_6–C_{16}, and C_4–C_{12}, respectively. The similarity of the bio-oils to the diesel fuel carbon range was found to be 42.45%, 76.80%, and 76.07% for spruce, HZSM-5-ex situ, and dolomite-ex situ, respectively. The diesel fuel carbon range of the HZSM-5-ex situ and dolomite-ex situ bio-oils was similar. Among the samples, the dolomite-ex situ bio-oil exhibited the closest structural resemblance to diesel fuel.

This study similarly promoted the formation of aromatic and aliphatic hydrocarbons, as well as a decrease in the number of oxygenated compounds. However, the HZSM-5 catalyst did not show the desired effect on catalytic co-pyrolysis compared to dolomite. Dolomite catalyst increases the formation of smaller hydrocarbon structures by promoting catalytic cracking in bio-oil. In particular, it converts carboxylic acid structures into ketones by ketonization. In addition, it contributes to the transformation of lignin-derived oligomers into aromatic and oxygenated phenol structures [41], [51], [52]. The results showed that dolomite is more effective than HZSM-5 in catalytic co-pyrolysis.

4 Conclusion

In this study, the spruce sawdust was catalytic co-pyrolyzed with glycerol using HZSM-5 and dolomite catalysts in a one-stage reactor to generate an improved and upgraded bio-oil. The main findings can be summarized as follows:

1. In spruce sawdust pyrolysis performed at different temperatures, the highest liquid product yield was recorded as 40.66 wt% at 550 °C,
2. In co-pyrolysis made with glycerol in different ratios (10 wt%, 20 wt%, 30 wt%) to increase the yield and quality of the pyrolysis oil, the highest liquid product yield in all experiments was obtained to be 44.11 wt% at mixture ratio with 20 wt%,
3. In catalytic co-pyrolysis of spruce sawdust with HZSM5 and dolomite increased the yield and quality of the pyrolysis oil, the highest bio-oil yield was found to be 45.91 wt% with dolomite-exsitu experiments,
4. It was observed that co-pyrolysis with glycerol also made significant improvements in the liquid product content. The amount of oxygen-free component, which was 4.81% (GC-MS peak area) in spruce sawdust pyrolysis, was determined as 8.02% due to co-pyrolysis with glycerol. When the effects of using HZSM-5 and dolomite catalysts inside and outside the reactor on the liquid product were examined, it was seen that the HZSM-5 catalyst reduced the number of oxygenated components,
5. The dolomite catalyst gave the closest results to the diesel-like bio-oil target. The oxygen-free component amounts of the bio-oils obtained from Dolomite-exsitu and HZSM5-exsitu were determined as 22.24% and 19.10%, respectively. The number of oxygenated compounds in the pyrolysis oil decreased but the ketone, furan, phenol, and alcohol structures continued to exist in the bio-oil. 2-Furancarboxaldehyde, Phenol, 4-methoxy-3-methyl-, HMF, and 1,6-Anhydro-Beta-D-Glucopyranose structures were primarily found in the pyrolysis bio-oil obtained from spruce sawdust. As a result of dolomite-exsitu experiments, mostly Phenol, 4-ethyl-2-methoxy- 9-Eicosene, 2-methoxy-4-methylphenol, and Methyl oleate structures were found in the bio-oil.

Catalytic co-pyrolysis of spruce sawdust gave positive results in obtaining clean, sustainable, and easily producible liquid fuel. The high oxygen content and presence of reactive components in bio-oils produced from biomass are their main disadvantages compared to fossil fuels. In future studies, the use of HZSM-5 and dolomite catalysts at different rates can be investigated to increase the quality of pyrolysis oil. In addition, the bio-oils obtained after catalytic co-pyrolysis can be further improved by catalytic cracking reactions. Better results can be obtained

using plastic materials rich in hydrogen and low in oxygen in the co-pyrolysis of spruce sawdust.

5 Author contribution statement

Ahmet Rasim Girişen contributed to investigation, Conceptualization, Visualization, Formal analysis, methodology and writing–original draft. Hakan Özcan contributed to data curation, supervision, funding acquisition, resources, methodology, project administration, validation, visualization, writing–review and editing.

6 Ethics committee approval and conflict of interest declaration

"There is no need for ethics committee approval for the prepared article". "There is no conflict of interest with any person/institution in the prepared article".

7 References

[1] Bhoi P, Ouedraogo A, Soloiu V, Quirino R. "Recent advances on catalysts for improving hydrocarbon compounds in bio-oil of biomass catalytic pyrolysis". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 121, 109676, 2020.

[2] Chia SR, Kit Wayne C, Show P-L, Ong HC, Phang S-M, Ling T, Nagarajan D, Lee D-J, Chang J-S. "Sustainable approaches for algae utilization in bioenergy production". *Renewable Energy*, 129, 838-852, 2017.

[3] Leong YK, Show PL, Ooi CW, Ling TC, Lan JC. "Current trends in polyhydroxyalkanoates (PHAs) biosynthesis: insights from the recombinant Escherichia coli". *Journal of Biotechnology*, 180, 52-65, 2014.

[4] Koyande A, Kit Wayne C, K R, Tao Y, Show P-L. "Microalgae: A potential alternative to health supplementation for humans". *Food Science and Human Wellness*, 8(1), 16-24, 2019.

[5] Tan S, Zhang Z, Sun J, Wang Q. "Recent progress of catalytic pyrolysis of biomass by HZSM-5". *Chinese Journal of Catalysis*, 34, 641-650, 2013.

[6] Panwar NL, Paul A. "An overview of recent development in bio-oil upgrading and separation techniques". *Environmental Engineering Research*, 26(5), 1-17, 2020.

[7] Gupta S, Mondal P. "Advances in upgradation of pyrolysis bio-oil and biochar towards improvement in bio-refinery economics: A comprehensive review". *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101276, 2021.

[8] Gayathiri M, Pulingam T, Lee KT, Sudesh K. "Activated carbon from biomass waste precursors: Factors affecting production and adsorption mechanism". *Chemosphere*, 294, 133-764, 2022.

[9] Kapluhan E. "Enerji coğrafyası açısından bir inceleme: biyokütle enerjisinin dünyadaki ve türkiye'deki kullanım durumu". *Marmara coğrafya dergisi*, 30, 97-125, 2014.

[10] Bridgwater AV. "Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading". *Biomass and Bioenergy*, 38, 68-94, 2012.

[11] Han Y, Gholizadeh M, Tran C-C, Kaliaguine S, Li C-Z, Olarte M, Garcia-Perez M. "Hydrotreatment of pyrolysis bio-oil: A review". *Fuel Processing Technology*, 195, 106140, 2019.

[12] Taşar Ş, Kaya F, Özer A. "A Study on the Pyrolysis of Peanut Shells at Different Isothermal Conditions and Determination of the Kinetic Parameters". *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 21(7), 306-313, 2015.

[13] Merdun H, Sezgin Vİ, Güzelçiftçi B. "Evaluation of bio-oil compounds of catalytic fast pyrolysis by multivariate analysis". *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences,* 25(3), 297-303, 2019.

[14] Özdemir A, Özkan A, Günkaya Z, Banar M. "Kentsel katı atıkların ve kentsel atıksu arıtma çamurlarının birlikte pirolizi ve sıvı ürün karakterizasyonu". *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences,* 28(6), 920-928, 2022.

[15] Rotliwala Y, Parikh P. "Thermal Coprocessing of High Density Polyethylene with Coal, Fly Ashes, and Biomass: Characterization of Liquid Products". *Energy Sources Part A-recovery Utilization and Environmental Effects*, 34, 1055-1066, 2012

[16] Solak A, Rutkowski P. "Bio-oil production by fast pyrolysis of cellulose/polyethylene mixtures in the presence of metal chloride". *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 16, 491-499, 2013.

[17] Solak A, Rutkowski P. "The effect of clay catalyst on the chemical composition of bio-oil obtained by co-pyrolysis of cellulose and polyethylene". *Waste management*, 34(2), 504-512, 2013.

[18] Brebu M, Uçar S, Vasile C, Yanik J. "Co-pyrolysis of pine cone with synthetic polymers". Fuel, 89, 1911-1918, 2010.

[19] Brebu M, Spiridon I. "Co-pyrolysis of LignoBoost Ò lignin with synthetic polymers". *Polymer Degradation and Stability*, 97, 2104-2109, 2012.

[20] David J. Mihalcik, Charles A. Mullen, Akwasi A. Boateng. " Screening acidic zeolites for catalytic fast pyrolysis of biomass and its components". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 92, 224-232, 2011.

[21] Pan Pan, Changwei Hu, Wenyan Yang, Yuesong Li, Linlin Dong, Liangfang Zhu, Dongmei Tong, Renwei Qing, Yong Fan. "The direct pyrolysis and catalytic pyrolysis of Nannochloropsis sp. residue for renewable bio-oils". *Bioresource Technology*, 101, 4593-4599, 2010.

[22] Carmines E, Gaworski CL. "Toxicological evaluation of glycerin as a cigarette ingredient". *Food and chemical toxicology : an international journal published for the British Industrial Biological Research Association*, 43, 1521-1539, 2005.

[23] Skoulou V, Manara P, Zabaniotou A. "H2 enriched fuels from co-pyrolysis of crude glycerol with biomass". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 97, 198-204, 2012.

[24] Kumar P, Singh VP, Tagade A, Sawarkar AN. "Thermochemical characterization of post-phytoremediated vetiver (Vetiveria zizanioides (L.) Nash) root and shoot for their prospective bioenergy potential". *Industrial Crops and Products*, 191, 115964, 2023.

[25] Uçar S, Karagöz S. "Co-pyrolysis of pine nut shells with scrap tires". *Fuel*, 137, 85-93, 2014.

[26] Anuar Sharuddin SD, Abnisa F, Wan Daud WMA, Aroua MK. "A review on pyrolysis of plastic wastes". *Energy Conversion and Management*, 115, 308-326, 2016.

[27] Uzoejinwa BB, He X, Wang S, El-Fatah Abomohra A, Hu Y, Wang Q. "Co-pyrolysis of biomass and waste plastics as a thermochemical conversion technology for high-grade biofuel production: Recent progress and future directions elsewhere worldwide". *Energy Conversion and Management*, 163, 468-492, 2018.

[28] Prakash R, Siddharth R, Gunasekar N. *Energy from Toxic Organic Waste for Heat and Power Generation.* Editors: Barik D. Chapter 10- Cracking of Toxic Waste, 139-149, Duxford, United Kingdom, *Woodhead Publishing*, 2019.

[29] Kuppens T, Cornelissen T, Carleer R, Yperman J, Schreurs S, Jans M, Thewys T. "Economic assessment of flash co-pyrolysis of short rotation coppice and biopolymer waste streams". *Journal of Environmental Management*, 91, 2736-2747, 2010.

[30] Han B, Chen Y, Wu Y, Hua D, Chen Z, Feng W, Yang M, Xie Q. "Co-pyrolysis behaviors and kinetics of plastics–biomass blends through thermogravimetric analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 115, 227-235, 2014.

[31] Yaman E, Ulusal A, Uzun BB. "Co-pyrolysis of lignite and rapeseed cake: a comparative study on the thermal decomposition behavior and pyrolysis kinetics". *Applied Sciences*, 3, 97, 2021.

[32] Slopiecka K, Bartocci P, Fantozzi F. "Thermogravimetric analysis and Kinetic study of poplar wood pyrolysis". *Applied Energy*, 97, 491–497, 2012.

[33] Fantozzi F, Frassoldati A, Bartocci P, Cinti G, Quagliarini F, Bidini G, Ranzi EM. "An experimental and kinetic modeling study of glycerol pyrolysis". *Applied Energy*, 184, 68-76, 2016.

[34] de Lucas A, Canizares P, Durán A, Carrero A. "Dealumination of HZSM-5 zeolites: Effect of steaming on acidity and aromatization activity". *Applied Catalysis A: General*, 154, 221-240, 1997.

[35] Adjaye JD, Sharma RK, Bakshi NN. *Advances in Thermochemical Biomass Conversion*. Editors: Bridgwater, AV. Catalytic Upgrading of Wood Derived Bio-Oil Over HZSM-5 Catalyst: Effect of Co-Feeding Steam, 1032-1046, Dordrecht, Netherlands, Springer, 1993.

[36] Valle B, Gayubo AG, Alonso A, Aguayo AT, Bilbao J. "Hydrothermally stable HZSM-5 zeolite catalysts for the transformation of crude bio-oil into hydrocarbons". *Applied Catalysis B: Environmental*, 100, 318-327, 2010.

[37] Oudejans JC, Van Den Oosterkamp PF, Van Bekkum H. "Conversion of ethanol over zeolite h-zsm-5 in the presence of water". *Applied Catalysis*, 3, 109-115, 1982.

[38] Sharma RK, Bakhshi NN. "Catalytic conversion of crude tall oil to fuels and chemicals over HZSM-5: Effect of co-feeding steam". *Fuel Processing Technology*, 27, 113-130, 1991.

[39] Katikaneni SPR, Adjaye JD, Bakhshi NN. "Studies on the Catalytic Conversion of Canola Oil to Hydrocarbons: Influence of Hybrid Catalysts and Steam". *Energy & Fuels*, 9, 599-609, 1995.

[40] Al-Obaidi MM, Ishak NS, Ali S, Arifin NA, Raja Shahruzzaman RM, Wan Abdul Karim Ghani WA, Yun Hin TY, Shamsuddin AH. "H2-Rich and Tar-Free Downstream Gasification Reaction of EFB by Using the Malaysian Dolomite as a Secondary Catalyst". *Catalysts*, 11(4), 447, 2021.

[41] Harith N, Hafriz RSRM, Arifin NA, Tan ES, Salmiaton A, Shamsuddin AH. "Catalytic co-pyrolysis of blended biomass–plastic mixture using synthesized metal oxide(MO)-dolomite based catalyst". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 168, 105776, 2022.

[42] Charusiri W, Vitidsant T. "Upgrading bio-oil produced from the catalytic pyrolysis of sugarcane (Saccharum officinarum L) straw using calcined dolomite". *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 6, 114-123, 2017.

[43] Islam MW. "A review of dolomite catalyst for biomass gasification tar removal". *Fuel*, 267, 117095, 2020.

[44] Wu Q, Ke L, Wang Y, Zhou N, Li H, Yang Q, Xu J, Dai L, Zou R, Liu Y, Ruan R. "Pulse pyrolysis of waste cooking oil over CaO: Exploration of catalyst deactivation pathway based on feedstock characteristics". *Applied Catalysis B: Environmental*, 304, 120968, 2022.

[45] Valle B, García-Gómez N, Remiro A, Gayubo AG, Bilbao J. "Cost-effective upgrading of biomass pyrolysis oil using activated dolomite as a basic catalyst". *Fuel Processing Technology*, 195, 106142, 2019.

[46] Chen X, Chen Y, Yang H, Wang X, Che Q, Chen W, Chen H. "Catalytic fast pyrolysis of biomass: Selective deoxygenation to balance the quality and yield of bio-oil". *Bioresource Technology*, 273, 153-158, 2019.

[47] Onay O, Koçkar O. "Fixed-bed pyrolysis of rapeseed (Brassica napus L.)". *Biomass & Bioenergy*, 26, 289-299, 2004.

[48] Zhou L, Yang H, Wu H, Wang M, Cheng D. "Catalytic pyrolysis of rice husk by mixing with zinc oxide: Characterization of bio-oil and its rheological behavior". *Fuel Processing Technology*, 106, 385–391, 2013.

[49] Nuttapan P, Nuwong C, Adisak P. "Effect of low-temperature hydrothermal treatment of HZSM-5 extrudates on the production of deeply-deoxygenated bio-oil via ex-situ catalytic fast pyrolysis of biomass". *Fuel*, 324, 124627, 2022.

[50] Praserttaweeporn K,Vitidsant T, Charusiri W. "Ni-modified dolomite for the catalytic deoxygenation of pyrolyzed softwood and non-wood to produce bio-oil". *Results in Engineering*, 14, 100461, 2022.

[51] Raja Shahruzzaman RMH, Ali S, Yunus R, Yun-Hin TY. "Green Biofuel Production via Catalytic Pyrolysis of Waste Cooking Oil using Malaysian Dolomite Catalyst". *Bulletin of chemical reactıon engineering and catalysis*, 13, 489-501, 2018.

[52] Hafriz RSRM, Nor Shafizah I, Arifin NA, Maisarah AH, Salmiaton A, Shamsuddin AH. "Comparative, reusability and regeneration study of potassium oxide-based catalyst in deoxygenation reaction of WCO". *Energy Conversion and Management*, 13, 100173, 2022.

Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 31(7), 1344-1349, 2025

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Synthesis, characterization, and photocatalytic performance evaluation of manganese tungstate for methyl red dye degradation

Mangan tungstatın sentezi, karakterizasyonu ve metil kırmızı boya giderimi için fotokatalitik performans değerlendirmesi

Mehmet Kayhan[1*], *Emine Kayhan*[2]

[1]Scientific Analysis Technological Application and Research Center, Usak University, Uşak, Türkiye.
mehmet.kayhan@usak.edu.tr

[2]Department of Quality Coordinatorship, Uşak University, Uşak, Türkiye.
emine.kayhan@usak.edu.tr

Received/Geliş Tarihi: 17.01.2025 Revision/Düzeltme Tarihi: 13.03.2025 doi: 10.5505/pajes.2025.27723
Accepted/Kabul Tarihi: 19.03.2025 Research Article/Araştırma Makalesi

Abstract

The increasing prevalence of synthetic dyes in industrial wastewater presents significant environmental challenges because of the toxicity and lack of effectiveness of conventional treatment methods. Methyl red, a widely used azo dye, is particularly problematic due to its high chemical stability. In this study, manganese tungstate ($MnWO_4$) was synthesized using a coprecipitation method and evaluated for its photocatalytic activity in methyl red degradation through UV-C exposure. The synthesized $MnWO_4$ was characterized using several techniques, including Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), ultraviolet-diffuse reflectance spectroscopy (UV-DRS), and scanning electron microscopy (SEM). SEM analysis revealed the formation of needle-like, nanometer-sized $MnWO_4$ particles with high aspect ratios, which are expected to enhance photocatalytic efficiency. XRD confirmed the development of a highly crystalline pure $MnWO_4$ phase, and FTIR spectra showed characteristic peaks corresponding to Mn-O and W-O bonds. The UV-DRS results revealed that the material possesses a direct band gap of 3.18 eV, suitable for UV-C light absorption. Photocatalytic experiments demonstrated that $MnWO_4$ effectively degraded methyl red, with the removal efficiency reaching nearly 60% after 180 minutes of irradiation. These findings suggest that $MnWO_4$ is a promising photocatalyst for environmental remediation, offering a simple, cost-effective solution for dye degradation in wastewater.

Keywords: Manganese tungstate ($MnWO_4$), Photocatalysis, Methyl red degradation, Wastewater treatment, Dye degradation, Environmental remediation.

Öz

Sentezlenen sentetik boyaların sanayi atıksularındaki artan yaygınlığı, toksisiteleri ve geleneksel arıtma yöntemlerine karşı dirençleri nedeniyle önemli çevresel zorluklar yaratmaktadır. Yaygın olarak kullanılan bir azo boyası olan metil kırmızı, yüksek kimyasal kararlılığı nedeniyle özellikle sorun teşkil eder. Bu çalışmada, manganez tungstat ($MnWO_4$), ko-precipitasyon yöntemi kullanılarak sentezlenmiş ve UV-C ışınımı altında metil kırmızının fotokatalitik bozunumu için değerlendirilmiştir. Sentezlenen $MnWO_4$, X-ışını kırınımı (XRD), Fourier dönüşüm infrared spektroskopisi (FTIR), Ultraviyole-difüz reflektans spektroskopisi (UV-DRS) ve Taramalı elektron mikroskobu (SEM) gibi çeşitli tekniklerle karakterize edilmiştir. SEM analizi, yüksek açısal oranlara sahip iğne benzeri, nanometre boyutlarında $MnWO_4$ parçacıklarının oluşumunu ortaya koymuştur, bu da fotokatalitik verimliliği artırması beklenen bir özelliktir. XRD, yüksek kristal yapıda saf bir $MnWO_4$ fazının oluşumunu doğrulamış ve FTIR spektrumları, Mn-O ve W-O bağlarına karşılık gelen karakteristik pikleri göstermiştir. UV-DRS sonuçları, malzemenin UV-C ışığı emme için uygun olan 3.18 eV'lik bir direk bant aralığına sahip olduğunu göstermektedir. Fotokatalitik deneyler, $MnWO_4$'ün metil kırmızıyı etkin bir şekilde bozduğunu ve 180 dakika sonra bozunma verimliliğinin neredeyse %60'a ulaştığını göstermiştir. Bu bulgular, $MnWO_4$'ün çevresel iyileştirme için umut verici bir fotokatalizör olduğunu ve atıksulardaki boya bozulması için basit ve maliyet etkin bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Mangan tungstat ($MnWO_4$), Fotokataliz, metil kırmızı bozunumu, Atıksu arıtımı, Boya bozunumu, Çevresel iyileştirme.

1 Introduction

The growing prevalence of synthetic dyes in manufacturing-related wastewater poses significant environmental challenges because of their harmful nature and resistance to biodegradation, and potential to accumulate in aquatic ecosystems [1]-[7]. Among these dyes, methyl red, a widely used azo dye, is particularly problematic owing to its strong chemical stability and inability to undergo degradation conventional wastewater treatment methods [8]-[10]. The release of such pollutants into water bodies not only disrupts ecosystems but also threatens human health, highlighting the urgent need for effective remediation strategies [11]-[13].

Advanced oxidation processes (AOPs) have been recognized as an effective approach for breaking down persistent organic contaminants. [14],[15]. Among these, photocatalysis has gained significant attention due to its ability to utilize solar energy to generate reactive oxygen species, responsible for decomposing complex organic species into simpler, less harmful byproducts [16],[17]. The effectiveness of a photocatalytic process is largely determined by the characteristics of the photocatalyst employed, including its bandgap, stability, and surface characteristics [18],[19].

Transition-metal tungstates, including materials such as Bi_2WO_6, $ZnWO_4$, and $CaWO_4$, have shown remarkable potential in photocatalytic applications due to their narrow bandgap, excellent thermal stability, and robust electronic properties [6],

*Corresponding author/Yazışılan Yazar

[20]-[22]. For example, Bi_2WO_6 has been widely researched for its superior photocatalytic performance when exposed to visible light, making it a benchmark material in this field [23], [24]. Similarly, $ZnWO_4$ has been recognized for its ability to degrade various organic pollutants under UV light [25], [26]. Despite these advancements, manganese tungstate ($MnWO_4$), a member of the same family of tungstates, remains underexplored.

$MnWO_4$ exhibits unique electronic and structural properties that make it a promising candidate for photocatalytic applications [27],[28]. Its narrow bandgap enables effective utilization of visible light, while its robust crystalline structure ensures stability under operational conditions [29], [30]. Recent studies have highlighted the potential of manganese-based oxides in environmental remediation, suggesting that $MnWO_4$ could exhibit excellent photocatalytic properties [31]-[33]. However, comprehensive investigations into its synthesis, characterization, and application for dye degradation, specifically for azo dyes like methyl red, are still lacking.

This study aims to address this gap by synthesizing $MnWO_4$ using a coprecipitation method and characterizing its morphological, structural, and optical characteristics through various techniques. The synthesized material's photocatalytic activity is evaluated for methyl red degradation upon exposure to visible light, providing insights into its effectiveness as an environmentally friendly catalyst.

The outcomes of this research are expected to contribute to the growing body of knowledge on transition-metal tungstates and their application in environmental remediation. By investigating the capacity of$MnWO_4$ in degradating methyl red, this study not only highlights its practical applicability but also lays the foundation for future research on manganese-based photocatalysts in addressing environmental pollution.

2 Materials and methos

2.1 Materials

The chemicals used in the synthesis, including sodium tungstate dihydrate ($Na_2WO_4{\cdot}2H_2O$) and manganese chloride tetrahydrate ($MnCl_2{\cdot}4H_2O$), had analytical grade quality and were purchased from Thermo Scientific. These chemicals were used as received, without any additional purification.

2.2 Synthesis of Manganese Tungstate

To synthesize manganese tungstate, 6 mmol of sodium tungstate dihydrate and 6 mmol of manganese chloride tetrahydrate were individually dissolved in 50 mL of ultra-pure water. Manganese chloride solution was gradually added drop by drop to the sodium tungstate solution with constant stirring. During the addition, the formation of a precipitate was observed.

After the addition was complete, stirring was continued for an additional 1 hour to ensure thorough mixing. The obtained precipitate was separated by filtration and repeatedly washed with distilled water to eliminate impurities. The filtered product was heat treated at 600°C for 5 hours. Finally, the calcined material was ground into a fine powder using an agate mortar, yielding the manganese tungstate product.

2.2.1 Characterization

The $MnWO_4$ sample synthesized via the coprecipitation method was subjected to various characterization techniques to analyze its properties. Phase analysis was carried out using a Rigaku Miniflex X-ray diffractometer with Cu Kα radiation. XRD patterns were recorded over a 2θ range of 10° to 90°. FTIR spectrum was collected using an ATR attachment (Spectrum Two, Perkin Elmer) in the wavenumber range of 400-4000 cm^{-1}. UV-DRS measurements were conducted to determine the band gap energy of the sample. The sample's morphology was analyzed using a Phenom ProX SEM fitted with a CeB_6 electron gun.

2.3 Photocatalytic Behavior Evaluation of Manganese Tungstate

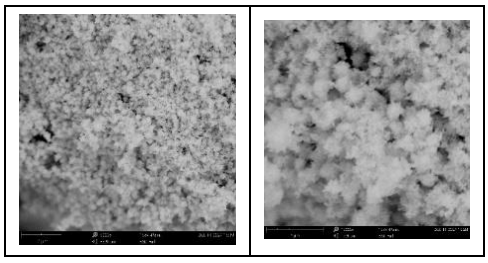
Photocatalytic experiments were conducted using a custom-designed photocatalysis system equipped with six UV-C lamps arranged in a circular pattern around a quartz cylindrical reactor. The solution in the reactor was continuously stirred using a magnetic stirrer, while air was bubbled through the system to ensure homogeneity and oxygenation. To prevent overheating caused by UV-C exposure, the reactor's outer chamber was cooled with air.

Methyl Red (MR) dye was prepared at a concentration of 400 ppm in an ethanol-distilled water mixture with a 40:60 ratio. From this stock solution, a 10 ppm MR solution was prepared by diluting it with distilled water to a total volume of 500 mL. The solution's pH was modified to 1.5 with the addition of HCl. For the photocatalytic experiments, 200 mg of manganese tungstate catalyst was added to the MR solution. The mixture was agitated and aerated in the reactor for 30 minutes to achieve adsorption equilibrium before initiating UV-C irradiation.

The photocatalytic activity of the manganese tungstate was assessed by a Perkin Elmer Lambda 35 UV-Vis Spectrophotometer. Absorbance measurements were taken initially at 0 minutes, immediately after the adsorption equilibrium was reached. Subsequently, the system was exposed to UV-C light, and UV-Vis measurements were taken at 15-minute intervals over a total irradiation time of 180 minutes. The absorbance was recorded across the wavelength range of 300-650 nm to monitor the degradation of MR dye.

3 Results and discussion

Figure 1 displays SEM images of the synthesized $MnWO_4$ samples, at 5000X magnification (Figure 1A) and 15000X magnification (Figure 1B). The SEM images clearly reveal needle-like, nanometer-sized $MnWO_4$ particles. This morphological structure can be attributed to the anisotropic growth process, where growth occurs more rapidly along one axis than along the others during the coprecipitation synthesis of $MnWO_4$. The needle-like morphology of $MnWO_4$ offers a high aspect ratio, which is expected to enhance its photocatalytic performance.



(A) (B)

Figure 1. SEM images of synthesized MnWO4 samples. (A): 5000X and (B): 15000X magnification.

The $MnWO_4$ was effectively produced through a straightforward coprecipitation method, and subsequently subjected to heat treatment in an open atmosphere. XRD confirmed the development of a highly crystalline pure $MnWO_4$ phase. As shown in Figure 2, the XRD pattern aligns well with the reference data from JCPDS Card No. 01-080-0152, with all observed peaks corresponding to the $MnWO_4$ phase. The sharp and distinct peaks in the pattern indicate that the synthesized sample possesses high crystallinity.

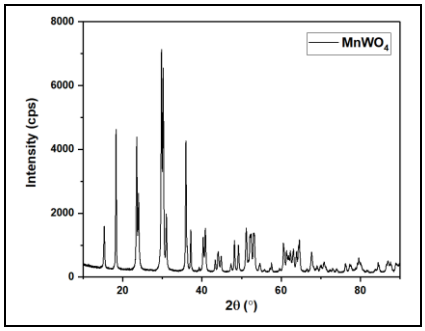


Figure 2. XRD pattern of the synthesized manganese tungstate sample, confirming its phase purity and good crystallinity. The diffraction peaks correspond closely with those of the standard JCPDS Card No. 01-080-0152, indicating the successful formation of the $MnWO_4$ phase.

The FTIR spectrum of the synthesized $MnWO_4$ was shown in Figure 3. The absorption peaks at 880 cm^{-1} and 793 cm^{-1} correspond to the symmetric and asymmetric stretching vibration modes of the W-O bond in the WO_2 terminal group, respectively [34]. The peak observed at 727 cm^{-1} is attributed to the asymmetric stretching vibrations of the W-O bond in the $(W_2O_4)_n$ structural network. Peaks at 579 cm^{-1} and 558 cm^{-1} are assigned to the stretching vibrations of the Mn-O bond [35], [36].

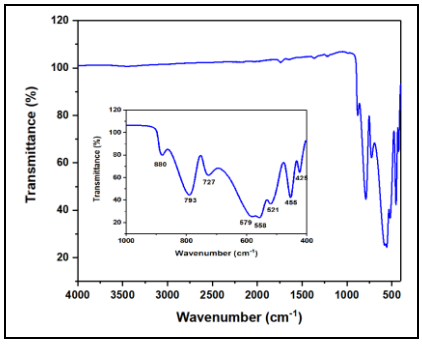


Figure 3. FTIR spectrum of the synthesized $MnWO_4$. Inset shows the bands in the range of 400-1000cm^{-1}.

Additionally, a weak band at 521 cm^{-1} is ascribed to the stretching vibrations of the Mn-O-Mn bond, while the low-intensity peak at 455 cm^{-1} corresponds to the in-plane deformation modes of the longest W-O bond. Lastly, the peak at 425 cm^{-1} is attributed to the in-plane deformation vibration mode of the W-O bond in the WO_2 terminal groups [36].

The light absorption characteristics $MnWO_4$ sample were examined using UV-DRS (see Figure 4). A prominent reflection peak at 518 nm was observed, which is attributed to the electronic transition between the O-2p and Mn-3d levels in $MnWO_4$. Additionally, a weaker band at 563 nm corresponds to the spin-forbidden transition between the e_g and t_{2g} orbitals of Mn-2p [37]. These findings align with those reported by Van Hanh et al. [38].

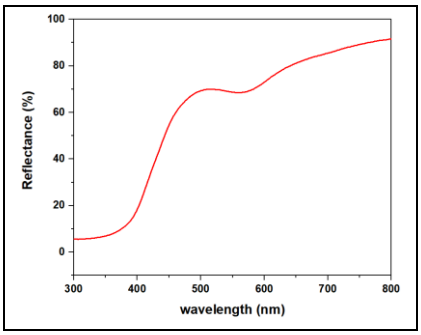


Figure 4. Reflectance data of the synthesized $MnWO_4$ sample via UV-DRS.

The band gap (E_g) of the synthesized $MnWO_4$ was calculated through the extrapolation of the Tauc plot derived from the Kubelka-Munk function. This involved extending the linear portion of the plot to the x-axis where $[F(R)h\nu]^n$ equals zero. Here, F(R) denotes the Kubelka-Munk function or remission function, h stands for Planck's constant (J·s), and ν represents the frequency of the photon (s^{-1}). For the direct band gap, n = 2, and for the indirect band gap, n = 1/2. $MnWO_4$ sample exhibited [39], [40] both an indirect band gap of 1.72 and 2.76 eV and a direct band gap of 3.18 eV (see Figure 5 and Figure 6).

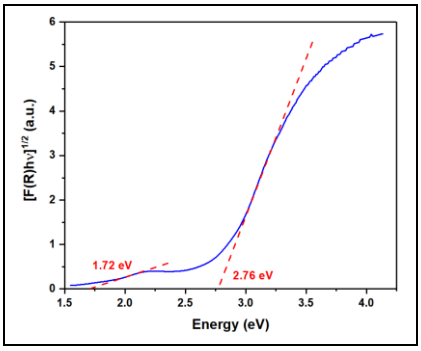


Figure 5. $[F(R)h\upsilon]^{1/2}$ versus energy plot via UV-DRS showing the indirect band gap of the synthesized $MnWO_4$.

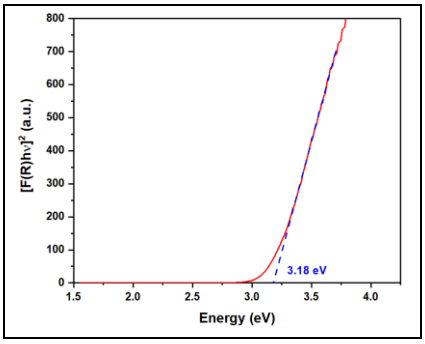


Figure 6. $[F(R)h\upsilon]^2$ versus energy plot via UV-DRS showing the direct band gap of the synthesized $MnWO_4$ sample.

The direct band gap of 3.18 eV for $MnWO_4$ positions it as a competitive photocatalyst compared to TiO_2 (~3.2 eV) [41] and ZnO (~3.37 eV) [42]. However, its band gap is slightly larger than that of g-C_3N_4 (~2.7 eV) [43] and $BiVO_4$ (~2.4 eV) [44], which are known for their superior visible-light absorption. To enhance the photocatalytic performance of $MnWO_4$, future studies could explore doping with transition metals or non-

metals to reduce the band gap and improve visible-light absorption, as well as forming heterojunctions with other semiconductors to enhance charge separation.

The photocatalytic activity of $MnWO_4$ was evaluated by using the catalyst in an acidic methyl red dye solution. In the UV-Vis analysis, the absorption peak at 518 nm was attributed to methyl red. Following the addition of 200 mg of $MnWO_4$, the solution was left in the dark for 30 minutes to establish a state of adsorption balance. After this adsorption period, UV-C lamps were switched on, and air bubbles were introduced into the reaction vessel. UV spectroscopy measurements were taken at 15-minute intervals, starting from the 0th minute, until the total photocatalytic reaction time reached 180 minutes. Figure 7 presents the UV spectra of the methyl red solution during the photocatalytic reaction, recorded between 0 and 180 minutes.

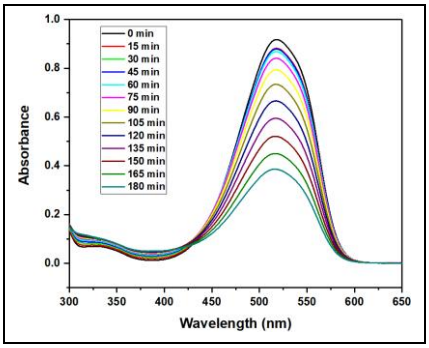


Figure 7. UV-Vis spectra of methyl red solution during photocatalytic breakdown by $MnWO_4$ during a period of 180 minutes. Spectra were recorded at 15-minute intervals, starting from the 0th minute immediately after the adsorption equilibrium was reached, showing the change in absorption at 518 nm as the photocatalytic reaction progressed.

The UV spectra shown in Figure 7 reveal a gradual decrease in the absorbance at 518 nm. This reduction in absorbance indicates the successful degradation of Methyl Red dye over the course of the photocatalytic reaction.

$$Degradation\ Efficiency = 100\frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \qquad (1)$$

The degradation efficiency of the photocatalytic reaction is calculated according to the equation (1) where C_t and C_0 represent the absorbance values of the methyl red solution at time t and at 0 minutes, respectively, as measured by a UV-Vis spectrometer and presented as a removal efficiency plot in Figure 8.

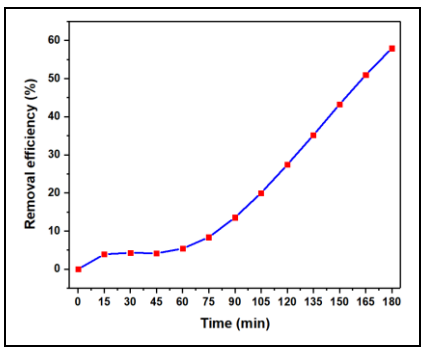


Figure 8. Removal efficiency of $MnWO_4$ on the photodegradation of Methyl Red dye.

As shown in Figure 8, the photocatalytic activity initially increased slowly during the first 15 minutes. From 15 to 45 minutes, the removal efficiency remained relatively constant at approximately 5%. In the latter phase of the photocatalytic reaction, the removal efficiency increased rapidly, reaching nearly 60% by the end of the 180-minute reaction.

4 Conclusion

In this study, manganese tungstate ($MnWO_4$) was effectively produced through a simple coprecipitation method and evaluated for its photocatalytic performance in degradating methyl red. The characterization findings confirmed the successful formation of $MnWO_4$ with high crystallinity and suitable optical properties for UV-C light absorption. SEM analysis revealed that the $MnWO_4$ particles exhibited a needle-like morphology with high aspect ratios, which likely contributed to their enhanced photocatalytic activity. The photocatalytic experiments demonstrated that $MnWO_4$ effectively degraded methyl red under UV-C irradiation, with a degradation efficiency of nearly 60% after 180 minutes. This research offers significant understanding and perspectives on the photocatalytic properties of $MnWO_4$ and its potential application in environmental remediation, particularly for the treatment of dye-contaminated wastewater.

5 Author contribution statements

Within the framework of this research, Mehmet Kayhan contributed to the conceptualization of the idea, experimental design, procurement of materials, and evaluation of the results. Meanwhile, Emine Kayhan played a role in conducting the literature review, analyzing the findings, and reviewing the manuscript for linguistic accuracy and content quality.

6 Ethics committee approval and conflict of interest statement

"There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared".

"There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared".

7 References

[1] Mofijur M, Hasan MM, Ahmed SF, Djavanroodi F, Fattah IMR, Silitonga AS, Kalam MA, Zhou JL, Khan TMY. "Advances in identifying and managing emerging contaminants in aquatic ecosystems: Analytical approaches, toxicity assessment, transformation pathways, environmental fate, and remediation strategies". *Environmental Pollution,* 341, 122889-122921, 2024

[2] Goswami D, Mukherjee J, Mondal C, Bhunia B. "Bioremediation of azo dye: A review on strategies, toxicity assessment, mechanisms, bottlenecks and prospects". *Science of The Total Environment*, 954, 176426-176445, 2024.

[3] Dutta S, Adhikary S, Bhattacharya S, Roy D, Chatterjee S, Chakraborty A, Banerjee D, Ganguly A, Nanda S, Rajak P. "Contamination of textile dyes in aquatic environment: Adverse impacts on aquatic ecosystem and human health, and its management using bioremediation". *Journal of Environmental Management*, 353, 120103-120125, 2024.

[4] Sahu A, Poler JC. "Removal and degradation of dyes from textile industry wastewater: Benchmarking recent advancements, toxicity assessment and cost analysis of treatment processes". *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(5), 113754-113786, 2024.

[5] Khandelwal D, Rana I, Mishra V, Ranjan KR, Singh P. "Unveiling the impact of dyes on aquatic ecosystems through zebrafish-a comprehensive review". *Environmental Research*, 261, 119684-119699, 2024.

[6] Kayhan M, Aksoy M, Kayhan E. "A Facile Synthesis of Photocatalytic Fe (OH)3 Nanoparticles for Degradation of Phenol". *ChemistrySelect*, 9(23), e202401367-202401373, 2024.

[7] Kütük N, Çetinkaya S. "Green synthesis of copper oxide nanoparticles using black, green and tarragon tea and investigation of their photocatalytic activity for methylene blue". *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 28(7), 954-962, 2022.

[8] Sma-Air S, Ritchie RJ. "Methyl red dye decolourization by the photosynthetic bacteria, Rhodopseudomonas palustris and Afifella marina". *International Biodeterioration & Biodegradation*, 196, 105915-105924, 2025.

[9] Sargazi S, Ghaneian MT, Rahmani M, Ebrahimi AA. "Application of cloud point extraction coupled with derivative spectrophotometry to remove binary mixture of Cresol Red and Methyl Orange dyes from aqueous solutions: Box-behnken design optimization". *Heliyon*, 10(21), e39628-39645, 2024.

[10] Riaz U, Farooq A, Alam J. "Microwave-assisted rapid degradation of Methyl red dye using Polyfuran/Polythiophene and its Co-oligomers as catalysts." *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 302, 123106-123114, 2023.

[11] Sharma S, Sharma S, Sharma KP. "Identification of a sensitive index during fish bioassay of an azo dye methyl red (untreated and treated)". *Journal of Environmental Biology*, 27(3), 551-555, 2006.

[12] Sharma S, Sharma S, Pathak S, Sharma KP. "Toxicity of the Azo Dye Methyl Red to the Organisms in Microcosms, with Special Reference to the Guppy (Poecilia reticulata Peters)". *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 70(4), 0753-0760, 2003.

[13] Sharma S, Sharma S, Upreti N, Sharma KP. "Monitoring toxicity of an azo dye methyl red and a heavy metal Cu, using plant and animal bioassays". *Toxicology and Environmental Chemistry*, 91(1), 109-120, 2009.

[14] Sievers M. *4.13-Advanced Oxidation Processes*, Editors: Wilderer P. Treatise on Water Science, 377-408, Oxford, United Kingdom, Elsevier, 2011.

[15] Ghangrekar MM. *Advanced Oxidation Processes.* Editors: Ghangrekar MM. Wastewater to Water: Principles, Technologies and Engineering Design, 733-794, Singapore, Springer Nature Singapore, 2022.

[16] Bopape DA, Ntsendwana B, Mabasa FD. "Photocatalysis as a pre-discharge treatment to improve the effect of textile dyes on human health: A critical review". *Heliyon,* 10(20), e39316-39347 2024.

[17] Lanjwani MF, Tuzen M, Khuhawar MY, Saleh TA. "Trends in photocatalytic degradation of organic dye pollutants using nanoparticles: A review". *Inorganic Chemistry Communications*, 159, 111613-111630, 2024.

[18] Zailan SN, Mahmed N, Bouaissi A, Mubarokah ZR, Norizan MN, Mohamad IS, Yudasari N, Shirajuddin SSM. "Adsorption efficiency and photocatalytic activity of silver sulphide-activated carbon (Ag2S-AC) composites". *Inorganic Chemistry Communications*, 171, 113633-113646, 2025.

[19] Zheng X, Shao Z, Lin J, Gao Q, Ma Z, Song Y, Chen Z, Shi X, Li J, Liu W, Tian X, Liu Y. "Recent advances of CuSbS2 and CuPbSbS3 as photocatalyst in the application of photocatalytic hydrogen evolution and degradation". *Chinese Chemical Letters*, 36, 110533-110548, 2024.

[20] Krishnapuram P, Choudhary J, Kagola UK, Jakka SK. *Photocatalytic and Sensing Properties of Rare-Earth Doped Tungstate Upconverting Host Materials*. Editors: Pawade VB, Dhoble SJ, Shinde KN, Swart HC, Upconversion Nanocrystals for Sustainable Technology, 179-204, Cambridge, USA, Woodhead Publishing, 2025.

[21] Abubakar HL, Tijani JO, Abdulkareem AS, Egbosiuba TC, Abdullahi M, Mustapha S, Ajiboye EA. "Effective removal of malachite green from local dyeing wastewater using zinc-tungstate based materials". *Heliyon*, 9(9), e19167-19193, 2023.

[22] Wu H, Peng J, Sun H, Ruan Q, Dong H, Jin Y, Sun Z, Hu Y. "Surface activation of calcium tungstate by europium doping for improving photocatalytic performance: Towards lanthanide site photocatalysis". *Chemical Engineering Journal*, 432, 134339-134349, 2022.

[23] Wei J, Chen Z, Tong Z. "Engineering Z-scheme silver oxide/bismuth tungstate heterostructure incorporated reduced graphene oxide with superior visible-light photocatalytic activity". *Journal of Colloid and Interface Science*, 596, 22-33, 2021.

[24] Wang J, Tang L, Zeng G, Zhou Y, Deng Y, Fan C, Gong J, Liu Y. "Effect of bismuth tungstate with different hierarchical architectures on photocatalytic degradation of norfloxacin under visible light". *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27(8), 1794-1803, 2017.

[25] Ahmed AI, Kospa DA, Gamal S, Samra SE, Salah AA, El-Hakam SA, Awad Ibrahim A. "Fast and simple fabrication of reduced graphene oxide-zinc tungstate nanocomposite with enhanced photoresponse properties as a highly efficient indirect sunlight driven photocatalyst and antibacterial agent". *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 429, 13907-13919, 2022.

[26] Rao L, Xu J, Ao Y, Wang P. "Photocatalytic degradation of methyl orange over bismuth tungstate under visible light". *Applied Surface Science*, 315, 191-196. 2014.

[27] Husain M, Rahman N, Azzouz-Rached A, Sfina N, Asad M, Hussain A, Ahmad R, Hamza RD, Humayun Q, Samreen A, Belhachi S, Uzair M, Abualnaja KM, Alosaimi G. "Investigating structural, optoelectronic, and mechanical properties of novel Tungsten-based oxides double-perovskites compounds Sr2XWO6 (X=Mn, Fe): A DFT approach". *Optik*, 315, 172045-172055, 2024.

[28] Harichandran G, Divya P, Radha S, Yesuraj J. "Facile and controllable CTAB-assisted sonochemical synthesis of one-dimensional MnWO4 nanorods for supercapacitor application". *Journal of Molecular Structure*, 1199, 126931-126941, 2020.

[29] Trung DD, Cuong ND, Trung KQ, Nguyen TD, Van Toan N, Hung CM, Hieu NV. "Controlled synthesis of manganese tungstate nanorods for highly selective NH3 gas sensor". *Journal of Alloys and Compounds*, 735, 787-794, 2018.

[30] Jiang YN, Liu BD, Yang WJ, Yang B, Liu XY, Zhang XL, Mohsin MA, Jiang X. "New strategy for the in-situ synthesis of single-crystalline MnWO4/TiO2 photocatalysts for efficient and cyclic photodegradation of organic pollutants". *CrystEngComm*, 18(10), 1832-1841, 2016.

[31] Zhu S, Ho SH, Jin C, Duan X, Wang S. "Nanostructured manganese oxides: natural/artificial formation and their induced catalysis for wastewater remediation". *Environmental Science: Nano*, 7(2), 68-396, 2020.

[32] Islam MA, Morton DW, Johnson BB, Mainali B, Angove MJ. "Manganese oxides and their application to metal ion and contaminant removal from wastewater". *Journal of Water Process Engineering*, 26, 264-280. 2018.

[33] Ishfaq A, Shahid M, Nawaz M, Ibrar D, Hussain S, Shahzad T, Mahmood F, Rais A, Gul S, Gaafar AZ, Hodhod MS, Khan S. "Remediation of wastewater by biosynthesized manganese oxide nanoparticles and its effects on development of wheat seedlings". *Frontiers in Plant Science*, 14, 1263813-1263828, 2023.

[34] Pirhashemi M, Habibi-Yangjeh A. "Fabrication of novel ZnO/MnWO4 nanocomposites with p-n heterojunction: Visible-light-induced photocatalysts with substantially improved activity and durability". *Journal of Materials Science & Technology*, 34(10), 1891-1901, 2018.

[35] Zheng M, Zhang H, Gong X, Xu R, Xiao Y, Dong H, Liu X, Liu Y. "A simple additive-free approach for the synthesis of uniform manganese monoxide nanorods with large specific surface area". *Nanoscale Research Letters*, 8(1), 166-173, 2013.

[36] Muthamizh S, Suresh R, Giribabu K, Manigandan R, Praveen Kumar S, Munusamy S, Narayanan V. "MnWO4 nanocapsules: Synthesis, characterization and its electrochemical sensing property". *Journal of Alloys and Compounds*, 619, 601-609, 2015.

[37] Nogami A, Suzuki T, Katsufuji T. "Second Harmonic Generation from Multiferroic MnWO4". *Journal of the Physical Society of Japan*, 77(11), 115001-115003, 2008.

[38] Van Hanh P, Hoang LH, Hai PV, Minh NV, Chen XB, Yang IS. "Crystal quality and optical property of MnWO4 nanoparticles synthesized by microwave-assisted method". J*ournal of Physics and Chemistry of Solids*, 74(3), 426-430, 2013.

[39] Chakraborty AK, Ganguli S, Kebede MA. "Photocatalytic degradation of 2-propanol and phenol using Au-loaded MnWO4 nanorod under visible light irradiation". *Journal of Cluster Science*, 23(2), 437-448, 2012.

[40] Almeida MAP, Cavalcante LS, Varela JA, Li MS, Longo E. "Effect of different surfactants on the shape, growth, and photoluminescence behavior of MnWO4 crystals synthesized by the microwave-hydrothermal method". *Advances in Powder Technology*, 23(1), 124-128, 2012.

[41] Kayhan E. Graphene: Synthesis, Characterization, Properties and Functional Behavior as Catalyst Support and Gas Sensor. Ph.D. Thesis, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Germany, 2013.

[42] Jafarova VN, Orudzhev GS. "Structural and electronic properties of ZnO: A first-principles density-functional theory study within LDA(GGA) and LDA(GGA)+U methods". *Solid State Communications,* 325, 114166, 2021.

[43] Bilal M, Wang L, Ur Rehman Z, Zheng K, Hou J, Butt FK, Hussain A, Ahmad J, Ullah S, Jrar JA, Ali S, Wang X. "Hydrogen production using g-C3N4 based photocatalysts: A review". *International Journal of Hydrogen Energy,* 96, 456-473, 2024.

[44] Kamble GS, Natarajan TS, Patil SS, Thomas M, Chougale RK, Sanadi PD, Siddharth US, Ling YC. "$BiVO_4$ As a sustainable and emerging photocatalyst: synthesis methodologies, engineering properties, and its volatile organic compounds degradation efficiency". *Nanomaterials (Basel)*, 13(9), 1528, 2023.

Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 31(7), 1350-1356, 2025

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Impact of titanate coated magnetite nanoparticles on the properties of rigid polyurethane foams

Titanat kaplı manyetit nanopartiküllerin sert poliüretan köpüklerin özellikleri üzerindeki etkisi

Buse Fem Yılmaz[1], *Meral Akkoyun Kurtlu*[1*], *Sibel Tuna*[2]

[1]Department of Polymer Materials Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Bursa Technical Univ. Bursa, Türkiye.
buseyilmazdoga@gmail.com, meral.akkoyun@btu.edu.tr

[2]Central Research Laboratory, Bursa Technical University, Bursa, Türkiye.
sibel.tuna@btu.edu.tr

Received/Geliş Tarihi: 09.07.2024 Revision/Düzeltme Tarihi: 15.04.2025 doi: 10.5505/pajes.2025.67016
Accepted/Kabul Tarihi: 21.04.2025 Research Article/Araştırma Makalesi

Abstract

Closed cell polyurethane-based materials represent more than 23% of all polyurethane manufacturing. Unlike to the use of closed cell polyurethane foams in a large variety of applications, these materials exhibit some drawbacks. Their limited mechanical strength and their limited thermal constancy hindering their usage in some areas can be given as examples. In the purpose to overcome and enhance the weaknesses of rigid polyurethane foams and at the same time enlarge the utilization areas of these materials, numerous studies were realized in the literature. The utilization of Fe_3O_4 nanoparticles in various fields, including magnetic resonance, has gained significant attention in recent years. These additives can improve at the same time the thermal and mechanical properties of polyurethane foams. Nevertheless, the development of new methods concerning the surface modification of the nanoparticles is important. The improvement of the interfacial interactions at the polyurethane-filler interface was largely investigated with various agents such as silica, surfactants and precursor metals in the literature. However, the use of a titanate-based coupling agent was not yet researched. In this work, a surface coating of Fe_3O_4 nanoparticles with a titanate-based coupling agent (Ti-Fe_3O_4) was realized to produce Fe_3O_4 filled rigid polyurethane foam nanocomposites at different filler ratios. Microstructural, mechanical, thermal and electrical conductivity properties of all foam nanocomposites were characterized. The FTIR spectra exhibited only the presence of physical interactions. In addition, an increase of the crystallinity ratio with the increase of the filler content was observed. Concerning the electrical and thermal conductivity results, a noticeable improvement was detected from the pure rigid polyurethane foam to the 50 wt.% Ti-Fe_3O_4 filled nanocomposite. From the mechanical test results, a higher performance was observed for the rigid polyurethane foam nanocomposite produced at 12.5 wt.%.

Keywords: Polymer composite, Rigid polyurethane foam, Magnetite, Titanate coupling agent.

Öz

Kapalı hücreli poliüretan bazlı malzemeler, tüm poliüretan üretiminin %23'ünden fazlasını temsil etmektedir. Kapalı hücreli poliüretan köpüklerin çok çeşitli uygulamalarda kullanılmasının aksine, bu malzemeler bazı dezavantajlar sergiler. Sınırlı mekanik dayanımları ve bazı alanlarda kullanımlarını engelleyen sınırlı termal dayanıklılıkları örnek olarak verilebilir. Sert poliüretan köpüklerin zayıf yönlerinin giderilmesi, geliştirilmesi ve aynı zamanda bu malzemelerin kullanım alanlarının genişletilmesi amacıyla literatürde çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Son yıllarda, manyetik rezonans da dahil olmak üzere çeşitli alanlarda Fe_3O_4 nanopartiküllerinin kullanımı önemli ölçüde dikkat çekmiştir. Bu katkı maddeleri aynı zamanda poliüretan köpüklerin termal ve mekanik özelliklerini de geliştirebilir. Bununla birlikte nanopartiküllerin yüzey modifikasyonuna ilişkin yeni yöntemlerin geliştirilmesi önemlidir. Poliüretan-katkı arayüzündeki arayüz etkileşimlerinin iyileştirilmesi literatürde silika, yüzey aktif maddeler ve prekürsör metaller gibi çeşitli ajanlarla büyük ölçüde araştırılmıştır. Ancak, titanat bazlı bir bağlayıcı ajanının kullanımı henüz araştırılmamıştır. Bu çalışmada, farklı katkı oranlarında Fe_3O_4 katkılı sert poliüretan köpük nanokompozitleri üretmek için Fe_3O_4 nanopartiküllerinin titanat bazlı bir bağlayıcı ajan ile yüzey kaplaması (Ti-Fe_3O_4) gerçekleştirilmiştir. Tüm köpük nanokompozitlerin mikroyapısal, mekanik, termal ve elektriksel iletkenlik özellikleri karakterize edilmiştir. FTIR spektrumları yalnızca fiziksel etkileşimlerin varlığını göstermiştir. Ek olarak, katkı oranının artmasıyla kristalleşme oranında da bir artış gözlemlenmiştir. Elektriksel ve termal iletkenlik sonuçlarına ilişkin olarak, saf rijit poliüretan köpüğünden ağırlıkça %50 Ti-Fe_3O_4 katkılı nanokompozite göre gözle görülür bir iyileşme tespit edilmiştir. Mekanik test sonuçlarından ağırlıkça %12.5 oranında üretilen rijit poliüretan köpük nanokompozitinin daha yüksek performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Polimer kompozit, Sert poliüretan köpük, Manyetit, Titanat bağlayıcı ajan.

1 Introduction

One of the most widely used materials in a wide range of areas such as automotive, bedding, electronic instrument bezels and structural parts, building, construction, textile and coating is polyurethane (PU) [1]. Different types of polyurethanes and especially polyurethane foams can be synthesized as rigid (closed cell) or flexible (open cell), classified according to their cell structure [2],[3]. Among these various cellular structures, it can be mentioned that closed cell or rigid polyurethane foam possesses the widest application domains in contrast to the different kind of foam [2]. Unlike to the use of closed cell polyurethane foams in a large variety of applications particularly in insulation, adhesion and coating due to their improved properties such as in particular electrical and thermal insulation, lightweight, dimensional stability, moisture resistance, sound resistance, these materials have some drawbacks [3],[4]. These latter can be for instance their limited mechanical strength but also their limited thermal constancy hindering their usage in some areas [5]. For these reasons and

*Corresponding author/Yazışılan Yazar

in the aim to overcome and improve the weaknesses of rigid polyurethane foams and at the same time enlarge the utilization areas of these materials, numerous studies were realized in the literature.

As a consequence, one of the most important ways to enhance the mechanical properties of rigid polyurethane foam was the addition of fillers and particularly nano-sized fillers and produce nanocomposite foams having improved final properties that can be applied in various fields.

Among the different nanofillers, particles having magnetic properties such as Fe_3O_4 particles have the potential to be used in specific areas (magnetic resonance imaging, biomedical and radio frequency interference shielding) requiring magnetic response and have attracted attention in the literature. These additives can simultaneously improve the thermal and mechanical properties of PU foams [6]. Nevertheless, magnetic nanoparticles have some disadvantages, in particular agglomeration, chemical reactivity, and oxidation.

For these reasons, the final properties of the particles can vary noticeably with the apparition of oxidation according to the environment where the nanoparticles are used exhibiting a huge reduction of the magnetic properties. As a result, the homogeneity of the filler dispersion is also affected. To resolve this dispersion problem due to the formation of large agglomerates is a critical point, this difficulty hugely affecting the processability of filled polymer foams.

The major way to prevent the apparition of these magnetite agglomerates is to stabilize the nanoparticles by different methods as largely reported in the literature. From these different methods used especially in the case of Fe_3O_4 particles filled closed cell polyurethane foams the surface modifications of the nanoparticles is the most widely applied one. In order to enhance the interfacial interactions between the nanofillers and polyurethane matrix various agents such as silica, surfactants, silane and precursor metals were analyzed [7-10]. The purpose of this work is the investigation of the effect of a coupling agent on the interfacial interactions at the filler-matrix interface to enhance the final mechanical properties of the magnetite added rigid polyurethane foam [11].

Among the various coupling agents, titanate-based materials have the possibility to react simultaneously with free protons and hydroxyls at the filler interface, allowing the development of an organic coating on the filler surface. As a result, the use of a titanate-based coupling agent can improve the dispersion of the filler into the polymer matrix and then the final mechanical properties of the nanocomposite [12].

This study aims to coat the surface of Fe_3O_4 particles with a titanate-based coupling agent and investigate the impact of this surface modification on the final microstructural, mechanical, thermal and electrical conductivity properties of closed cell polyurethane foam nanocomposites.

2 Materials and methods

2.1 Materials

Magnetite (Fe_3O_4) nanoparticles given in Figure 1 were supplied from Nanokar/Türkiye with an average initial particle size of about 30 nm and were used as a reinforcement material for rigid polyurethane foams. Titanate (TYTAN TM CP-219) served as a coupling agent by modifying the surface of magnetite nanoparticles and was procured from Borica/Taiwan. Polyol and isocyanate were used as raw materials in the production of rigid polyurethane foams. Commercial grade isocyanate (Izokim RD 001) (NCO content of 31%, density of 1.23 g/cm^3 and viscosity of 0.2 Pa.s) and polyol (KIMrigid RD 057) (density of 1.03 g/cm^3 and viscosity of 0.4 Pa.s) supplied from Kimteks/Türkiye were used in this study. The blowing agent used in this formulation is water and it was directly included in the commercial polyol at a water content of 4.4 wt.%.

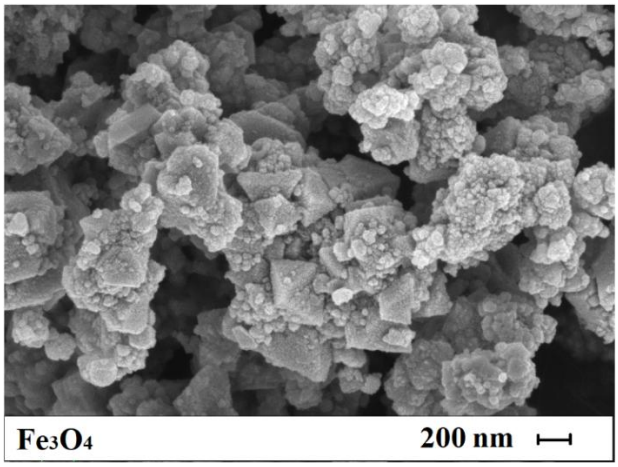


Figure 1. SEM image of magnetite.

2.2 Preparation of modified magnetite nanoparticles

First of all, to remove the humidity of Fe_3O_4 nanoparticles, the powder was kept waiting at 100°C in an oven for about two hours [13]. Then, an ethanol/Fe_3O_4 suspension was prepared using 200 mL of ethanol and a magnetic stirrer. Afterwards, based on the literature, 2.5 wt.% titanate used as coupling agent was added to the ethanol/Fe_3O_4 suspension and mixed at 100 rpm for 2 hours and at room temperature [12]. Finally, the residual ethanol was removed from the surface modified magnetite (Ti-Fe_3O_4) powder in an oven at a temperature of 100°C for 24 hours [13].

2.3 Preparation of unfilled and modified magnetite filled rigid PU foam nanocomposites (RPU/Ti-Fe_3O_4)

For the production of RPU/Ti-Fe_3O_4 nanocomposites, Ti-Fe_3O_4 nanopowders prepared at various weight ratios (12.5, 25, 50 wt.% in polyol) were filled into polyol (Table 1).

Table 1. Compositions of Polyol/Ti-Fe_3O_4 suspensions.

RPU/Ti-Fe_3O_4 nanocomposites	Ti-Fe_3O_4 (wt.%)	Polyol (wt.%)
RPU	0	100
RPU/Ti-Fe_3O_4_12.5	12.5	87.5
RPU/Ti-Fe_3O_4_25	25	75
RPU/Ti-Fe_3O_4_50	50	50

The range of filler ratios was determined based on the literature to detect the amount giving the optimum final properties [3],[4]. In a first step, polyol/Ti-Fe_3O_4 suspensions were sonicated (40 kHz frequency for 10 minutes) in a cold-water bath to have a better control of the suspension temperature, using an ultrasonic homogenizer (Bandelin/HD 4200). Then, the polyol/Ti-Fe_3O_4 suspensions were mixed using a mechanical stirrer (2000 rpm for 1 minute). Finally, isocyanate was mixed with the polyol/Ti-Fe_3O_4 suspension for a further five seconds and the final blend was placed in a rectangular mold having the appropriate dimensions for all

characterizations. The weight ratio of the polyol blend to isocyanate was 100:58.4 (isocyanate index = 100). At this stage, all samples were left in the mould for at least 24 hours to allow full curing of the material.

2.4 Characterization methods

The scanning electron microscopy analysis of all samples (pure and Ti-Fe_3O_4 filled RPU foam nanocomposites) was carried out using a Carl Zeiss Gemini 300 device. The sections perpendicular to the foaming direction were observed and images were registered to calculate the cell parameters (average cell diameter and average strut thickness) with ImageJ software for at least 100 cells.

Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy analysis of pure and Ti-Fe_3O_4 filled RPU foam nanocomposites was conducted by Thermo Scientific Nicolet iS50 device. FTIR analyses, in which the functional groups and the changes in these groups with the addition of fillers were evaluated, were carried out in the wavenumber range of 4000-600 cm^{-1} with a resolution of 4 cm^{-1} and a scan number of 16.

X-ray diffraction (XRD) analysis was carried out using a Bruker D8 Discover X-ray diffractometer. Patterns of unfilled and Ti-Fe_3O_4 filled RPU foam nanocomposites were recorded at diffraction angles (2θ) ranging from 5° to 90°. The step time and the increment were 0.02° and 0.5 second, respectively. The level of crystallization (CI) was calculated according to the Segal equation given in Equation (1). In the equation, I_c represents the highest intensity of the crystal area peak and I_{am} represents the intensity of the amorphous region [14].

$$\% \, CI = \frac{I_c - I_{am}}{I_c} \, x \, 100 \qquad (1)$$

The tensile test was performed using the SHIMADZU-AGS-X instrument based on the ASTM D638 standard. For each nanocomposite, the test was repeated for 5 test specimens.

Thermal conductivity properties of unfilled and Ti-Fe_3O_4 filled RPU foam nanocomposites were measured using a Laser Comp. Fox 314 (TA Instruments) device. The measurement was realized at ten different points for each RPU foam nanocomposite.

The electrical resistivity of all nanocomposites was measured with a Keitley 2400 source meter device and the measurement was repeated for three test samples of 9cm×9cm×3mm dimensions. During the measurement, 1 minute was kept for each sample. The results were recorded every 5 seconds. Then, a graph was created with electrical conductivity values according to the test data obtained.

3 Results and discussions

3.1 Scanning electron microscope analyses

SEM images of the cross-sectional surfaces of unfilled RPU foam and 12.5, 25 and 50 wt.% Ti-Fe_3O_4 filled RPU foam samples were given in Figure 2 under ×100 magnification rate. Using the SEM images recorded, 100 measurements were realized for each foam with the ImageJ program and as a result of these measurements the changes in mean strut thickness (µm) and mean cell diameter (µm) values were calculated and graphed in Figure 3 and 4, respectively. When Figures 3 and 4 were examined in line with the graphs obtained, it can be observed that with the addition of 12.5 wt.% Ti-Fe_3O_4 to the rigid PU foam structure, the strut thickness and cell diameter increased to a certain level compared to the unfilled PU foam. However, a decrease at higher filler ratios such as 25 wt.% and 50 wt.% can be seen. This result can be explained by the fact that the addition of magnetite nanoparticles caused the emergence of more nucleation sites, thus rising the cell density [3],[4]. With the use of high weight ratios of Ti-Fe_3O_4 nanoparticles, agglomeration formation occurred as can be seen in the SEM micrographs obtained at a high magnification ratio (×20000) in Figures 5-7 [15]. SEM images (Figures 5, 6, and 7) revealed that the magnetite particles were well dispersed especially at 12.5 wt.% ratio in the RPU foam matrix, which was in correlation with the mechanical analyses results.

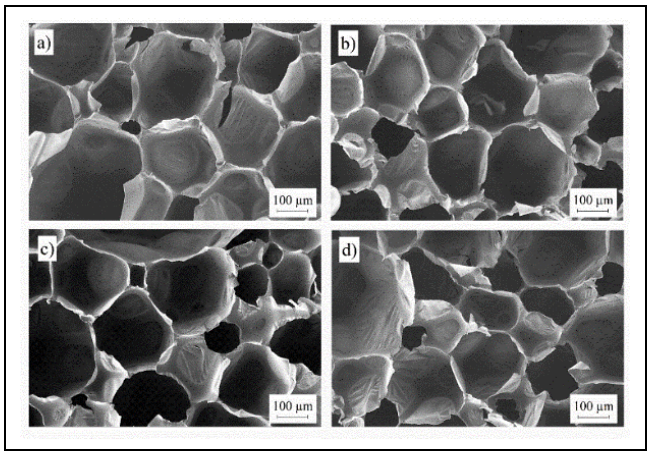


Figure 2. SEM images of a) unfilled RPU foam and (b): 12.5 wt.%. (c): 25 wt.% and (d): 50 wt.% Ti-Fe_3O_4 filled RPU foam nanocomposites.

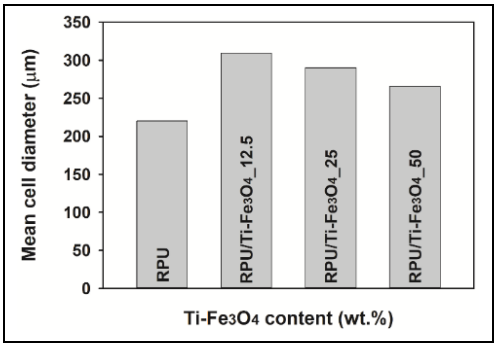


Figure 3. Mean cell diameter of unfilled RPU and Ti-Fe_3O_4 filled RPU foam nanocomposites prepared at different filler ratios (12.5, 25 and 50 wt.%).

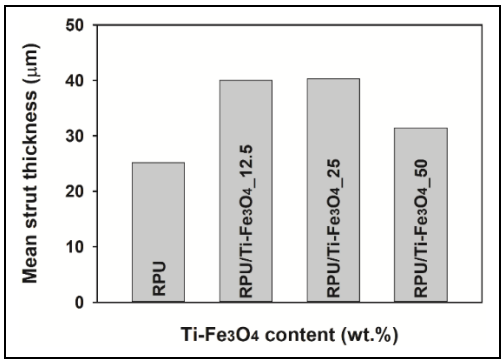


Figure 4. Mean strut thickness of unfilled RPU and Ti-Fe_3O_4 filled RPU foam nanocomposites prepared at different filler ratios (12.5, 25 and 50 wt.%).

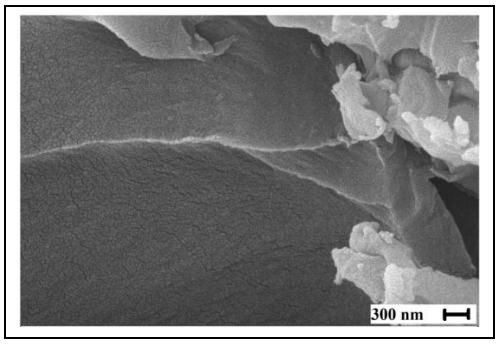


Figure 5. SEM image of Ti-Fe_3O_4 filled RPU foam nanocomposites prepared at 12.5 wt.%.

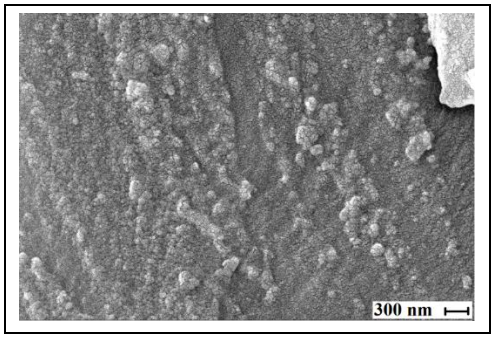


Figure 6. SEM image of Ti-Fe_3O_4 filled RPU foam nanocomposites prepared at 25 wt.%.

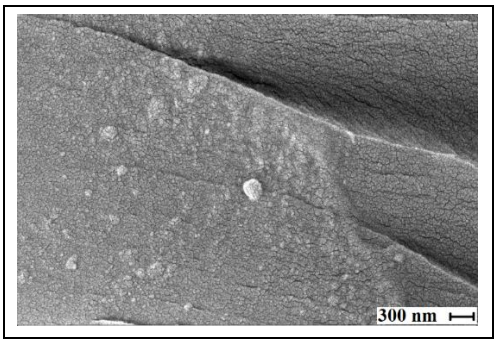


Figure 7. SEM image of Ti-Fe_3O_4 filled RPU foam nanocomposites prepared at 50 wt.%.

3.2 Fourier transform infrared spectroscopy analyses

FTIR spectra of unfilled and Ti-Fe_3O_4 filled RPU foam nanocomposites were presented in Figure 8. In the FTIR spectra of the samples, the N-H stretching vibration peaks at 3300 cm^{-1} are the first to be noticed and this peak characterizes the formation of polyurethane [16],[17]. The symmetrical and asymmetrical stretching behaviour of the C-H bond is indicated by the double peaks at 2920 and 2855 cm^{-1} [18]. The peak region observed at around 2270 cm^{-1} can be associated with the properties of the isocyanate band and the presence of aromatic rings in the isocyanate structure can be characterized by peaks in the 1595 and 1455 cm^{-1} wavenumbers [18],[19]. Carboxylic acid derivatives involved in the structure of the polyol were associated with the peak at 1705 cm^{-1} [20],[21]. When the FTIR spectra of unfilled and Ti-Fe_3O_4 filled RPU foam nanocomposites were examined, similar peaks and functional groups were observed. The spectra of the Ti-Fe_3O_4 filled foam nanocomposites generally contain the functional groups detected in the structure of RPU.

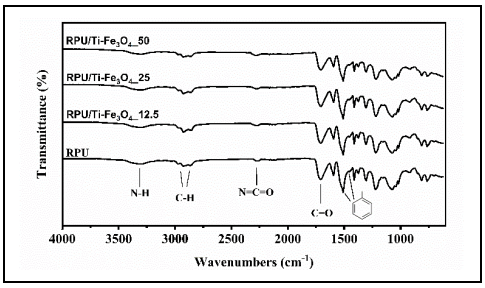


Figure 8. FTIR spectra of unfilled and Ti-Fe_3O_4 filled RPU foam nanocomposites.

This result can be explained by the fact that the added Ti-Fe_3O_4 fillers do not interact chemically with the RPU matrix and the interactions that occur are only physical interactions. In composite materials, the interface is defined as the boundary between two layers with different chemical structures. At this interface region, parameters such as chemistry, polymer chain mobility, degree of hardening and crystallinity behaviour may differ [22]. Although interfacial interactions, particularly in carbon fibre reinforced polymer composites, are reported to occur through primary bonds between the two phases, there is no conclusive analytical evidence for this effect. In filler reinforced composite systems, interactions are reported to occur mainly through secondary bonds such as hydrogen bonding and van der Waals interactions [23]. In polymer matrix composites, the interphase refers to those portions of the long chain polymers of the matrix that are degraded by interaction with the filler phase. These interactions can occur at functional groups located at the end or along the chains, and molecular conformational changes as a result of interaction with the filler phase affect the interface and interphase formation. In addition, particle size has a direct effect on the volume fraction required to form a continuous interphase [24].

3.3 X-ray diffraction analyses

Diffractograms of unfilled and Ti-Fe_3O_4 filled RPU foam nanocomposites were given in Figure 9. When Figure 9 was analyzed, no sharp peak was observed in the unfilled RPU sample and the plateau regions indicated the amorphousness of the sample [25].

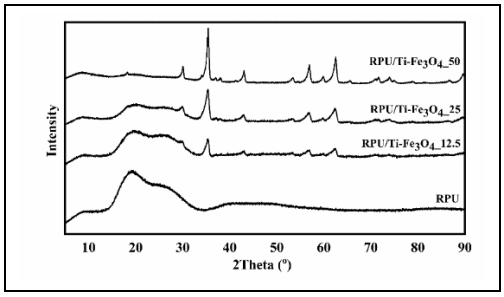


Figure 9. XRD diffractograms of unfilled and Ti-Fe_3O_4 filled RPU foam nanocomposites.

In the 12.5 wt.% Ti-Fe_3O_4 filled sample, crystal peaks started to appear and as the ratio increases, the intensities of the peaks around 2θ = 35.426, 62.515, 56.923, 30.041, and 59.872° increased significantly. These peaks, which reached the highest intensity at 50 wt.% filler ratio, can be related to the increase in crystallinity caused by the addition of inorganic additives [26]. After determining the amorphous and crystalline phases of the samples, the level of crystallization (CI) was calculated with the help of diffractograms. According to the Segal Equation (1)

used, the crystallinity ratio of the unfilled RPU sample could not be determined, while the CI values of RPU foam composites prepared with 12.5, 25, and 50 wt.% Ti-Fe_3O_4 filler were determined as 4.3, 14.3, and 43.5%, respectively. In composite systems where there is compatibility between filler and matrix, it is stated that the crystallinity values increase as the filler ratio increases. In cases where the filler and matrix are compatible and interfacial interactions are high, it is stated that the fillers added to the composite structures provide nucleation sites for the regular stacking of polymer chains, thus increasing the crystallinity of the composite structures [27],[28]. It has been reported in the literature that an increase in crystallinity can lead to a decrease in hardness and elongation at break [29]. It was observed that this change in crystallinity values was also compatible with the mechanical strength values.

3.4 Mechanical analyses

The tensile strength and elongation at break results of the unfilled and 12.5, 25 and 50 wt.% Ti-Fe_3O_4 filled RPU foam samples were given in Figures 10 and 11, respectively. When the tensile strength results in Figure 10 were examined, it can be observed that the RPU foam structure with the highest tensile strength value was 12.5 wt.% Ti-Fe_3O_4 filled RPU foam, and an increase of approximately 23% in tensile strength value was achieved. This increase in tensile strength values, obtained for a 12.5 wt.% filler rate, is a result of the homogeneous distribution of the titanate coated magnetite filler in the structure [30]. This can be associated with the fact that titanate acts as a molecular bridge between the filler and the polymeric foam matrix, reacting with both the magnetite nanoparticles and the surface atoms of the polyurethane, positively affecting the interfacial properties.

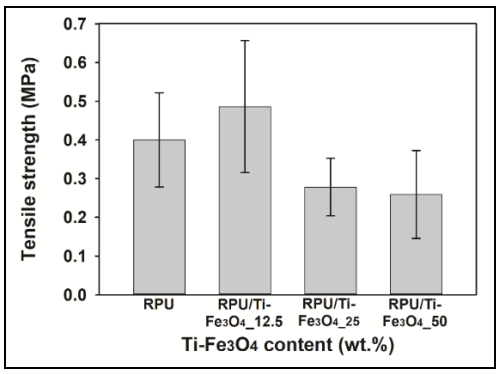


Figure 10. Tensile strength variations of unfilled and 12.5 wt.%, 25 wt.% and 50 wt.% Ti-Fe_3O_4 filled RPU foam samples.

On the other hand, 50 wt.% Ti-Fe_3O_4 filled RPU foam exhibited the lowest tensile strength and this decrease can be related to the agglomerations observed for a high percentage of nanofillers in the foam structure, as demonstrated in SEM images given in Figures 7 [31]. According to these mechanical test results, it can be stated that the use of 12.5 wt.% Ti-Fe_3O_4 exhibited a critical filler content. This situation can be expressed by the percolation threshold achieved at a certain point, as widely interpreted in the literature [3],[4].

As can be seen in Figure 11, with the increase in the Ti-Fe_3O_4 nanoparticles ratio, the elongation at break values decreased as expected. Based on these results, when a comparison was made according to the filler ratios, the sample giving the lowest elongation at break value was 50 wt.% Ti-Fe_3O_4 filled RPU foam. The highest percentage of elongation at break was obtained for the unfilled RPU foam.

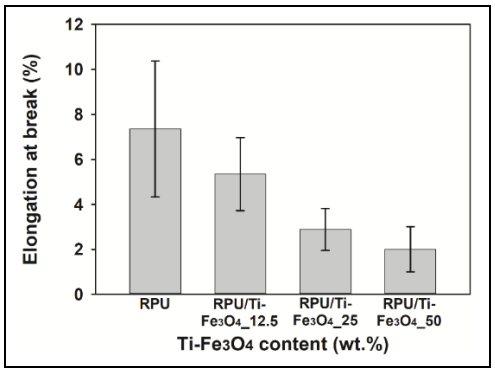


Figure 11. Elongation at break variations of unfilled and 12.5 wt.%, 25 wt.% and 50 wt.% Ti-Fe_3O_4 filled RPU foam samples.

3.5 Thermal conductivity analyses

The thermal conductivities recorded for the unfilled RPU foam and Ti-Fe_3O_4 filled RPU foam nanocomposites obtained at various Ti-Fe_3O_4 ratios (12.5, 25, 50 wt.%) were gathered in Figure 12. An improvement from 0.02431 W/m.K for the unfilled RPU foam to 0.02646 W/m.K for the 50 wt.% Ti-Fe_3O_4 filled RPU foam nanocomposite can be detected from the results. As a consequence, the thermal conductivity of RPU/Ti-Fe_3O_4 foam nanocomposites demonstrated a higher increase of nearly 9% for the 50 wt.% Ti-Fe_3O_4 filled RPU nanocomposite. Considering the error bars detected, it can be stated that an increase of the filler ratio engendered an increase tendency of the thermal conductivity. This evolution was in correlation with the cell size evolution. From the comparison of these results with the cell diameter variations, it can be noticed that as the filler ratio increases in RPU foam nanocomposites an augmentation of the cell diameter and thermal conductivity was observed. This behavior is in correlation with the literature where a similar effect has been detected for magnetite filled foams composites [1],[12],[32],[33].

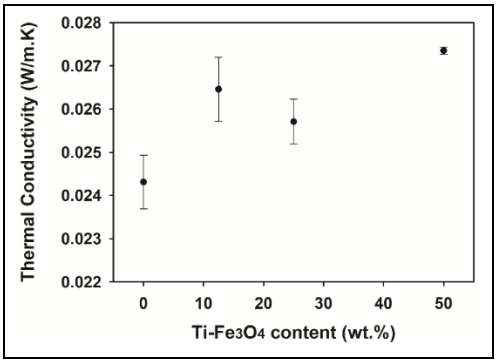


Figure 12. Thermal conductivity of unfilled and Ti-Fe_3O_4 filled RPU foam nanocomposites.

3.6 Electrical conductivity results

The electrical conductivity values of unfilled RPU foam and Ti-Fe_3O_4 filled RPU foam nanocomposites obtained at various Ti-Fe_3O_4 ratios (12.5, 25, 50 wt.%) and calculated as the inverse of the electrical resistivity values were detected experimentally and represented in Figure 13. It can be seen from this Figure 13 that a visible improvement of the value from the unfilled foam to the 12.5wt.% Ti-Fe_3O_4 filled RPU foam is observed and then a more constant evolution of the electrical conductivity was obtained between 12.5 wt.% and 50wt.% Ti-Fe_3O_4 filled foam nanocomposites.

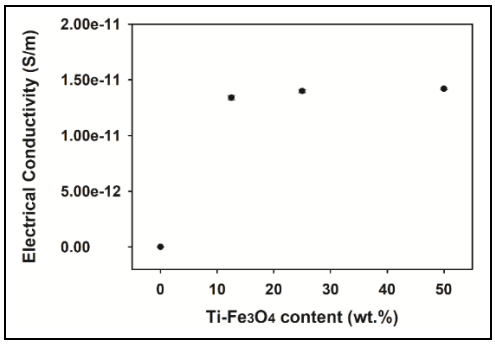


Figure 13. Electrical conductivity of unfilled and Ti-Fe_3O_4 filled RPU foam nanocomposites.

As a result, with an increase of the Ti-Fe_3O_4 content to 50 wt.% a rise from 1.64×10^{-14} to 1.42×10^{-11} was seen. The presence of a critical Ti-Fe_3O_4 ratio of 12.5 wt.% in this work can be interpreted by the presence of a percolation threshold as discussed in the literature [11],[12], this critical point showing the apparition of a conductive pathway formed by Ti-Fe_3O_4 nanoparticles into the RPU foam.

4 Conclusions

In this study, titanate coated Fe_3O_4 nanoparticles were filled to the RPU foams and prepared at three different ratios (12.5, 25 and 50 wt.%). The microstructure, electrical conductivity, thermal conductivity and mechanical properties of unfilled RPU and RPU/Ti-Fe_3O_4 foam nanocomposites were characterized. The FTIR spectra demonstrated that Ti-Fe_3O_4 fillers do not interact chemically with the RPU matrix and the interactions are only physical interactions. Furthermore, an increase of the crystallinity ratio with the increase of the filler content was observed. The results exhibited an increase in the average strut thickness and the average cell diameter for the foam nanocomposite filled at 12.5 wt.% representing the percolation threshold in this study. Afterwards, a reduction of these parameters was observed with the augmentation of the Ti-Fe_3O_4 weight ratio. Concerning the electrical and thermal conductivity results, a noticeable improvement was detected from the pure RPU foam to the 50 wt.% Ti-Fe_3O_4 filled nanocomposite. From the mechanical test results, a higher performance can be seen for the RPU foam nanocomposite produced at 12.5 wt.%.

5 Authors contribution statements

In the scope of this study, Buse Fem Yılmaz contributed to the design of the work, experimental study, data analysis, and writing the manuscript. Meral Akkoyun Kurtlu contributed to the design of the work, experimental study, data analysis, formal editing, visualization, writing the manuscript, review and editing. Sibel Tuna contributed to the data analysis, visualization, and writing the manuscript. All authors read and approved the final manuscript.

6 Ethics committee approval and conflict of interest statement

"There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared".

"There is no conflict of interest with any person/institution in the article prepared".

7 References

[1] Aydoğan B, Usta N. "Investigation into the effects of intumescent flame-retardant addition on flame resistance and harmful emissions of rigid polyurethane foams". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(8), 984-989, 2017.

[2] Chuang YC, Li TT, Huang CH, Huang CL, Lou CW, Chen YS, Lin JH. "Protective rigid fiber-reinforced polyurethane foam composite boards: Sound absorption, drop-weight impact and mechanical properties". *Fibers and Polymers*, 17(12), 2116-2123, 2016.

[3] Akkoyun M, Suvaci E. "Effects of TiO_2, ZnO, and Fe_3O_4 nanofillers on rheological behavior, microstructure, and reaction kinetics of rigid polyurethane foams". *Journal of Applied Polymer Science*, 133(28), 43658, 2016.

[4] Akkoyun M. "Electrical and thermal conductivities of iron (II, III) oxide added rigid polyurethane foam nanocomposites". *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 205-215, 2021.

[5] Alavi Nikje MM, Noruzian M, Moghaddam ST. "Novel polyurethane rigid foam/organically modified iron oxide nanocomposites". *Polymer Composites*, 38(5), 877-883, 2015.

[6] Verdolotti L, Di Caprio MR, Lavorgna M, Buonocore GG. "Polyurethane nanocomposite foams: Correlation between nanofillers, porous morphology, and structural and functional properties". *Polyurethane Polymers*., 31, 277-310, 2017.

[7] Bayrak A. Manyetik Nano Parçaciklarin (mnp) Kontrollü Sentezi ve Yüzey Modifikasyonu ile Polimerleşme Tepkimelerinde Kullanilmaları. MSc Thesis, İnönü Universitesi, Malatya, Türkiye, 2012.

[8] Hao H, Zhang A, Cheng Y, Cong P. "The modification mechanisms of silane coupling agent (SCA) on the physical properties of thermosetting polyurethane asphalt binder (PUAB)". *Construction and Building Materials*, 350, 128836, 2022.

[9] Yun D, Kim JH. "Performance enhancements of PU composite foams reinforced with starfish particles chemically treated by silane derivatives". *Advanced Powder Technology*, 35(3), 104349, 2024.

[10] Zhou X, Jiang F, Hu Z, Wu F, Gao M, Chai Z, Wang Y, Gu X, Wang Y. "Study on the flame retardancy of rigid polyurethane foam with phytic acid-functionalized graphene oxide". *Molecules*, 28, 6267, 2023.

[11] Latinwo GK, Ogunleye OR, Agarry SE, Dada EO, Tijani IA. "Effect of stearic acid and titanate coupling agent modified calcium carbonate on mechanical properties of flexible polyurethane foam". *International Journal of Composite Materials*, 8(4), 91-96, 2018.

[12] Monte SJ. "Titanate and zirconate coupling agents in foamed polymers". *Cellular Polymers*, 20(3), 149-188, 2001.

[13] Lin CR, Chu YM, Wang SC. "Magnetic properties of magnetite nanoparticles prepared by mechanochemical reaction". *Materials Letters*, 60(4), 447-450, 2006.

[14] Segal GA. Crystal Structure Determination by Means of X-Ray Diffraction. MSc Thesis, University of New South Wales, Sydney, Avustralya, 1967.

[15] Bradai H, Koubaa A, Bouafif H, Langlois A, Samet B. "Synthesis and characterization of wood rigid polyurethane composites". *Materials*, 15(12), 4316, 2022.

[16] Shi Y, Zhan X, Luo Z, Zhang Q, Chen F. "Quantitative IR characterization of urea groups in waterborne polyurethanes". *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 46(7), 2433–2444, 2008.

[17] Maia LS, Zanini NC, Camani PH, Barbosa RFS, Souza AG, Medeiros SF, Rosa DS. "Coffee husks residues incorporated into polyurethane foam towards greener material for diesel S10 and S500 removal and recovery". *Industrial Crops and Products*, 189, 115747, 2022.

[18] Suleman S, Khan SM, Jameel T, Aleem W, Shafiq M. "Synthesis and characterization of flexible and rigid polyurethane foam". *Asian Journal of Applied Sciences*, 2(5), 701-710, 2014.

[19] Trovati G, Sanches EA, Neto SC, Mascarenhas YP, Chierice GO. "Characterization of polyurethane resins by FTIR, TGA, and XRD". *Journal of Applied Polymer Science*, 115(1), 263–268, 2010.

[20] Reinerte S, Avotina L, Zarins A, Cabulis U, Viksna A. "TG/DTA-FTIR as a method for analysis of tall oil based rigid polyurethane foam decomposition gaseous products in a low oxygen environment". *Polymer Degradation and Stability*, 180, 109313, 2020.

[21] Członka S, Bertino MF, Kośny J, Strąkowska A, Masłowski M, Strzelec K. "Linseed oil as a natural modifier of rigid polyurethane foams". *Industrial Crops and Products*, 115, 40–51, 2018.

[22] Sharpe LH. "Some fundamental issues in adhesion: a conceptual view". *The Journal of Adhesion*, 67, 277–289, 1998.

[23] Jesson DA, Watts JF. "The interface and interphase in polymer matrix composites: effect on mechanical properties and methods for identification". *Polymer Reviews*, 52, 321–354, 2012.

[24] Rothon RN, Hancock M. *General Principles Guiding Selection and Use of Particulate Materials*. Editor: Rothon RN. Particulate-Filled Polymer Composites, 1-42, England, Longman Scientific & Technical, 1995.

[25] Chuayjuljit S, Maungchareon A, Saravari O. "Preparation and properties of palm oil-based rigid polyurethane nanocomposite foams". *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(2), 218–225, 2010.

[26] dos Santos LM, Ligabue R, Dumas A, Le Roux C, Micoud P, Meunier JF, Martin F, Einloft S. "New magnetic nanocomposites: Polyurethane/Fe_3O_4-synthetic talc". *European Polymer Journal*, 69, 38–49, 2015.

[27] Berrabah I, Dehouche N, Kaci M, Bruzaud S, Deguines CH, Delaite C. "Morphological, crystallinity and thermal stability characterization of poly (3-hydroxybutyrate-Co-3-hydroxyhexanoate)/zinc oxide nanoparticles bionanocomposites: Effect of filler content". *Materials Today: Proceedings*, 53(1), 223–227, 2022.

[28] Tuna S. "Optimization of parameters on fig leaf powders added polylactic acid-based composite films using Taguchi method". *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 150, 1–17, 2025.

[29] Siemann U. *Solvent Cast Technology–A Versatile Tool for Thin Film Production. In: Scattering Methods and the Properties of Polymer Materials*. Editors: Stribeck N, Smarsly, B. Scattering Methods and the Properties of Polymer Materials. Progress in Colloid and Polymer Science, 1–14, Berlin, Heidelberg, Springer, 2005.

[30] Głowacz-Czerwonka D, Zakrzewska P, Oleksy M, Pielichowska K, Kuźnia M, Telejko T. "The influence of biowaste-based fillers on the mechanical and fire properties of rigid polyurethane foams". *Sustainable Materials and Technologies*, 36, e00610, 2023.

[31] Akkoyun S, Akkoyun M. "Improvement of thermal conductivity of rigid polyurethane foams with aluminum nitride filler". *Cellular Polymers*, 40, 87–98, 2021.

[32] Chen L, Rende D, Schadler LS, Ozisik R. "Polymer nanocomposite foams". *Journal of Materials Chemistry A*, 1, 3837, 2013.

[33] Lee Y, Jang MG, Choi KH, Han C, Kim WN. "Liquid-type nucleating agent for improving thermal insulating properties of rigid polyurethane foams by HFC-365mfc as a blowing agent". *Journal of Applied Polymer Science*, 133, 43557, 2016.

Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 31(7), 1357-1365, 2025

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Zerde (yellow rice pudding) prepared using different spices: Biological activity, physical properties, textural properties and aroma profile

Farklı baharatlar kullanılarak hazırlanan zerde (sarı renkli pirinçli puding): Biyolojik aktivite, fiziksel özellikler, tekstürel özellikler ve aroma profili

Nebahat Kıratlı[1], *Seher Arslan*[1*]

[1]Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, Pamukkale University, Denizli, Türkiye.
nebahatyildirim2@gmail.com, sehera@pau.edu.tr

Received/Geliş Tarihi: 19.09.2024 Revision/Düzeltme Tarihi: 15.03.2025 doi: 10.5505/pajes.2025.15829
Accepted/Kabul Tarihi: 24.03.2025 Research Article/Araştırma Makalesi

Abstract

Zerde is a yellow rice-based milk dessert traditionally prepared with saffron. This study aimed to develop zerde formulations using alternative spices and to monitor the products during storage. Saffron, known as red gold, is the most expensive spice. In recent years, turmeric has attracted interest due to its positive health effects. Safflower, also referred to as false saffron, has been another product of interest. Five zerde formulations were created using saffron, safflower, turmeric, a turmeric-saffron combination, and a turmeric-safflower combination. The different spices and storage conditions significantly influenced the syneresis value, water-holding capacity, and b value ($p<0.05$). The highest antioxidant activity was found in the zerde formulation that included turmeric and safflower. The sample with safflower exhibited the highest syneresis value during storage. While ethyl acetate was abundant in the samples containing saffron and safflower, guaiacol was the prevalent aroma compound in turmeric formulations. The color values (Hunter L, a, and b) ranged from 69.47 to 72.91, (-)2.71 to (-5.76), and 22.31 to 25.74 during storage, respectively. The zerde formulated with turmeric received the highest scores for general acceptability and taste on the 4th day and 8th of storage. Turmeric or formulations containing turmeric could be used as a substitute for saffron, which is an expensive spice.

Keywords: Dairy desserts, Flavor, Texture, Color, Zerde.

Öz

Zerde, geleneksel olarak safran kullanılarak hazırlanan sarı renkli pirinçli sütlü tatlıdır. Bu çalışmanın amacı, zerde üretiminde alternatif baharatlar kullanarak zerde formülasyonları geliştirmek ve bunları depolama süresince takip etmektir. Safran, dünyanın en pahalı baharatı olup "kırmızı altın" olarak bilinmektedir. Son yıllarda sağlık açısından olumlu etkileri nedeniyle zerdeçal önemli bir baharat haline gelmiştir. Aspir, yalancı safran olarak bilinmektedir. Bu çalışmada safran, aspir, zerdeçal, zerdeçal-safran kombinasyonu ve zerdeçal-aspir kombinasyonunu içeren beş farklı zerde formülasyonu hazırlanmıştır. Farklı baharatlar ve depolama süresi sineresis değerini, su tutma kapasitesini ve b değerini önemli ölçüde ($p<0.05$) etkilemiştir. Zerdeçal ve aspir içeren zerde formülasyonu en yüksek antioksidan aktiviteye sahiptir. Aspir kullanılan örnek, depolama sırasında en yüksek sineresis değerini sergilemiştir. Etil asetat safran ve aspir içeren örneklerde en fazla bulunurken, guaiacol zerdeçal içeren formülasyonlarda en fazla bulunan aroma bileşeni olmuştur. Renk değerleri (Hunter L, a ve b) sırasıyla 69.47-72.91, (-2.71)-(-5.76) ve 22.31-25.74 aralığında bulunmuştur. Zerdeçal ile formüle edilen zerde, depolamanın 4. ve 8. günlerinde en yüksek genel kabul edilebilirlik ve tat puanına sahip olmuştur. Pahalı bir baharat olan safranın yerine zerdeçal veya zerdeçal içeren formülasyonlar kullanılabilir.

Anahtar kelimeler: Sütlü tatlılar, Flavor, Tekstür, Renk, Zerde.

1 Introduction

Zerde is a milk-based sweet made with rice, sugar, and saffron. Sholeh zard, shir-berenj, fereni, qaemaq, and boulame are very popular rice-based puddings in Iran. The zerde dessert is also known as Sholeh zard [1].

Saffron, which belongs to the Iridaceae family, is a spice obtained from the dried dark red stigmas of *Crocus sativus* L. [2]. It is the most expensive spice in the world. Saffron is also referred to as red gold. Due to its color, aroma, and intense taste, saffron is used as a food additive [3]. The most important components in saffron are crocin, picrocrocin, and safranal, which provide saffron's color, bitter taste, and odor. Iran is the leading country in saffron production worldwide [4]. Safflower (*Carthamus tinctorius L.*) is known by several names, such as false "Zaffer", "Fake Saffron " and "Dyer's Saffron". It is a bushy, herbaceous annual or winter annual plant with yellow, red, or orange flowers [5]. Safflower flowers contain two pigments: red (carthamin), which is insoluble in water, and yellow (carthamidin), which is soluble in water [6]. Safflower seeds contain oil (30%), protein (20%), and crude fiber (35%), and they are a good source of minerals (Zn, Cu, Mn, Fe), vitamins (thiamine, β-carotene), and tocopherol [7]. Turmeric (*Curcuma longa*) is a perennial herbaceous plant from the ginger family (Zingiberaceae), characterized by yellow flowers, large leaves, and rhizomes. It is frequently used in the cuisines of Malesia, India, China, Polynesia, and Thailand [8]. Curcumin, a yellow-orange pigment obtained from turmeric, offers various health benefits, such as anti-inflammatory, antioxidant, chemopreventive, antimicrobial, antiviral, and anticancer properties [9].

Zerde is a milk dessert that incorporates saffron in its preparation. However, zerde is lesser-known and produced in limited quantities due to the use of saffron, a costly spice. Therefore, exploring alternative spices to saffron is essential for broader adoption of zerde. There is no comprehensive study

*Corresponding author/Yazışılan Yazar

assessing the biological, physical, and aromatic effects of various spices in zerde production. This study aims to contribute to both scientific literature and the food industry. In this research, different formulations were created for zerde production utilizing safflower, turmeric, and saffron. This study aims to evaluate the impact of different spices on the biological activities, physical characteristics, textural properties, and aroma profile of zerde.

2 Materials and methods

2.1 Materials

UHT milk, vanilla, corn starch, egg, sugar, and rice were procured from a local market in Denizli, Türkiye. Safflower and turmeric powder were obtained from a herbalist in Denizli. Saffron was purchased from a herbalist in Safranbolu, Türkiye

2.2 Zerde production

The base formulation for the zerde dessert includes milk (1 L), vanilla (7.5 g), sugar (210 g), corn starch (22.5 g), and egg yolk (25 g). Saffron and/or safflower should be soaked in water one day prior.

Approximately 10 kg of milk was used for each batch. The research was conducted in duplicate. The production was separated into five groups. The control sample was prepared with saffron (0.08 g/L). The second group (SF) was prepared using safflower (1 g/L). The third group (T) was made using turmeric (0.625 g/L milk). The fourth group (S-T) was prepared using saffron (0.04 g/L milk) and turmeric (0.312 g/L). The fifth group was prepared using turmeric (0.312 g/L milk) and safflower (0.5 g/L). First, rice was boiled in water until tender. After it was cooled, milk and spices were added. Saffron and safflower should be soaked in water overnight before production to transfer the color of the spices into the water; this colored water was then used in production. Powdered turmeric was used directly in the milk. Egg yolk and corn starch were mixed and dissolved in the milk at appropriate quantities at 40°C. After heating the mix to 80 °C, the egg yolk and corn starch solution were added. Then, sugar and sweet vanillin were mixed in appropriate quantities. This mixture was heated to 85 °C and continuously stirred until the desired consistency was achieved. The formulations were poured into containers and cooled down to 25 °C. Samples were stored in the refrigerator during the analyses. Each zerde formulation was prepared in duplicate. All analyses were performed at first day, 4th day, and 8th day.

2.3 Chemical composition and physical analyses

The total dry matter, protein, and fat content were determined according to the gravimetric procedure [10], the Kjeldahl Method [10], and the Gerber method, respectively [11]. The total sugar content was established using the Lane-Eynon method [12].

The color was analyzed using a Hunter colorimeter (Hunter Miniscan Xe, HunterLab, Reston, VA). The L (lightness), a (red-green), and b (yellow-blue) values were evaluated.

For water holding capacity (WHC), zerde samples (10 g) were placed in centrifuge tubes and centrifuged for 40 minutes at 5000 rpm using a Nüve NF 1200 R centrifuge (Ankara, Türkiye). The supernatant was decanted, and the remaining part (R) was weighed. WHC (%) was calculated using the following equation:

R (g)*100 /initial sample (g). Syneresis was measured using the method outlined by Kadağan and Arslan [13].

2.4 Bioactive characteristics

The samples were extracted using the method described by Peker and Arslan [14]. Fifteen grams of the sample extract was mixed with 30 mL of methanol. The sample was homogenized for 1 minute, sonicated for 10 minutes, and kept in a shaker water bath for 15 minutes. Then, it was centrifuged (Nüve NF 1200 R, Ankara, Türkiye) for 15 minutes at 4 °C and at 8500 rpm. The zerde samples were also analyzed for total phenolic content and antioxidant activity as described by Peker and Arslan [14]. Total phenolic content was measured using Folin-Ciocalteu (FC) reagent.

For this purpose, 5 mL of diluted FC reagent (1:10, FC: water) and 4 mL of sodium carbonate solution (75 g/L) were added to a 1 mL sample or standard. After the mixture was kept in the dark for 2 hours, absorbance and concentration were read in the wavelength spectrophotometer at 760 nm.

The antioxidant activity was determined using the 2.2-diphenyl-1-picrylhydrazyl radical (DPPH) scavenging method. Briefly, 2850 µL of the DPPH reagent was mixed with 150 µL of zerde samples in test tubes. The samples were left at room temperature in the dark for 60 minutes. Measurements were taken using a spectrophotometer at an absorbance of 515 nm.

2.5 Textural analysis

The texture analysis was conducted following the methodology described by Kadağan and Arslan [13] utilizing a texture analyzer (Brookfield CT3, Brookfield Engineering Laboratory, Middleboro, MA, USA). The texture parameters of zerde samples were determined at ambient temperature using a texture profile analysis mode (TPA) with a cylinder probe (12.7 mm diameter) at a test speed of 2 mm/s.

2.6 Optical microscopy

A light microscope (Olympus BX 50, Olympus Optical Co. Ltd., Japan) was utilized to examine the microstructure of milk dessert samples. After the samples were thinly spread on the slide, they were observed using 10x objectives. Photographs of the microstructure were captured using a Kameram 21 CMOS.

2.7 Determination of the aromatic profile

The aroma compounds in zerde samples were examined using solid phase microextraction with CAR/PDMS fibers (30/50 µm carboxen/polydimethylsiloxane, 1 cm long, Supelco, Bellefonte, CA, USA). A 3g sample was placed into a 20 mL headspace vial and maintained at 50 °C for 10 minutes. It was then extracted with CAR/PDMS fiber for 55 minutes and desorbed for 5 minutes before injected into the capillary column of the GC-MS device (Agilent 7000 Series Triple Quad). A capillary column (HP-5MS, 30 m length x 0.25 mm inner diameter x 0.25 µm film thickness, 5% phenyl methyl polysiloxane) was used to separate volatile compounds. The temperature of the GC oven was scheduled to start at 35 °C for 5 minutes, increasing by 4 °C/min to 140 °C, where it was held for 5 minutes. The temperature was then raised to 250 °C at a rate of 10 °C per minute, maintaining it for 5 minutes. Helium served as the carrier gas, and the electron energy was set to 70 eV. Aroma compounds were identified using NIST14 and FLAVOR 2.

2.8 Sensory analysis

Sensory analysis was conducted with 30 participants (aged 20-50 years, consisting of 16 females and 14 males) from the graduate students, undergraduate students and members in the Food Engineering Department. After the samples were

stored at 4 °C, they (20 mL cups, 4 °C) were labeled with three random digits and served. Participants scored the samples based on appearance, color, odor, taste, and general appreciation on a seven-point hedonic scale (1=dislike extremely, 4=neither like nor dislike, and 7=like extremely).

2.9 Statistical analyses

The experimental design evaluated the effects of five formulations, coded as S, SF, T, T-S, and T-SF, on the characteristics of zerde. A three-factor (time × formulation × batch) factorial experiment was conducted in this study. Each combination of factors (3 time × 5 formulation × 2 batch) included two replications for analysis. Statistical analysis was performed using the SPSS software (IBM Statistics Data Editor Version 20). The average values were compared using Duncan's test at the 5% ($p < 0.05$) significance level.

3 Results and discussion

3.1 Chemical analyses

The changes in dry matter, fat, protein contents, and pH values in all samples were not statistically significant ($p \geq 0.05$). The chemical analysis of the five formulations is presented shown in Table 1. The dry matter content of milk desserts called Muhallabi, which uses different spices (saffron and turmeric powder), was determined between 29.45% and 33.64% [15] The chemical composition of brown rice pudding reported by Puri et al. [16] was generally higher when compared to the current findings.

3.2 Physical properties

The effects of different formulations and storage periods on syneresis, water-holding capacity, and b values were significant ($p<0.05$). Table 2 indicates that the highest serum separation and water-holding capacity among zerde samples were achieved with the SF and T-S samples. In starch-based systems, syneresis can occur during storage due to the reorganization and retrogradation of starch molecules [17]. In a study on turmeric powder and turmeric starch, the water-binding capacity of the starch derived from turmeric (up to 70 °C) was lower than that of dried and cured turmeric samples. Researchers suggested that this difference could be attributed to turmeric powder's protein and dietary fiber content. They reported that dried turmeric powder's protein content and dietary fiber level were 9.12-9.27% and 3.41-4.10%, respectively [18]. Similarly, in our study, the turmeric formulations demonstrated higher water-holding capacity and lower syneresis values than the other samples. The interactions between rice starch and milk proteins create the desired structure in such dairy desserts.

Product formulations and processes, such as heat treatment time, mixing, and cooling, affect the stability of puddings [19]. Therefore, turmeric powder in the present study may positively affect water binding due to its chemical composition. At the end of storage, the T code sample exhibited the lowest syneresis. The syneresis values of all samples increased compared to the initial values. The samples' highest and lowest L values were obtained for T and T-S, at 72.91 and 70.55, respectively, at the beginning of storage. Generally, the a values of zerde samples changed in the order of T> T-SF>SF> T-S > control during storage. Table 2 shows that among the zerde types, the T-S sample had the highest b value. Since the b values were positive in the zerde samples, yellowness was noted in the products. Comparatively, the T sample had the second highest b value, followed by S, T-SF, and SF. Majzoobi et al. [20] reported that the L, a, and b values of milk desserts enriched with wheat germ ranged from 65.0 to 83.33, -6 to -9, and 18 to 30, respectively. The a and b values were quite similar to those found in a study on pudding dessert by Okur [15]. Prasad et al. [21] reported lower L* and b* values in herbal burfi (Indian dairy dessert) samples when compared to the present color findings.

Table 1. Composition+standard deviation of zerde samples.

Code	Dry matter (%)	Fat (%)	Protein (%)	Sugar (%)	pH
S	30.17±0.81	2.93±0.25	2.98±0.10	19.23±3.28	6.57±0.03
SF	30.37±1.03	2.93±0.32	3.00±0.06	18.37±3.58	6.55±0.02
T	30.23±1.25	3.10±0.17	2.99±0.09	18.88±2.55	6.54±0.02
T-S	30.79±1.29	2.73±0.12	2.85±0.10	16.85±3.43	6.51±0.06
T-SF	29.56±1.27	2.80±0.26	2.95±0.02	17.37±2.66	6.50±0.02

Table 2. Effect of different spices and storage periods on the physical properties of zerde

Properties	Storage period	S	SF	T	T- S	T-SF
Syneresis	1	18.21 ± 2.69^{BCa}	19.48 ± 1.74^{Ca}	13.39 ± 1.44^{ABa}	14.94 ± 5.12^{ABCab}	11.33 ± 3.01^{Aa}
(%)	4	20.24 ± 3.23^{Ba}	20.97 ± 6.29^{Ba}	15.50 ± 2.94^{ABab}	11.10 ± 3.46^{Aa}	13.57 ± 3.98^{Aab}
	8	24.06 ± 4.63^{Aa}	24.12 ± 3.54^{Aa}	18.85 ± 3.39^{Ab}	20.33 ± 3.94^{Ab}	20.11 ± 6.48^{Ab}
Water	1	86.49 ± 2.65^{Ab}	84.52 ± 1.98^{Ab}	87.89 ± 3.07^{Ab}	92.36 ± 1.33^{Bb}	88.21 ± 2.84^{Aa}
Holding	4	83.03 ± 5.84^{ABab}	82.10 ± 4.42^{Aab}	88.69 ± 2.97^{BCb}	90.78 ± 2.05^{Cb}	86.74 ± 2.74^{ABCa}
capacity(%)	8	76.16 ± 6.72^{Aa}	77.08 ± 4.82^{Aa}	83.19 ± 1.93^{Aa}	83.82 ± 3.63^{Aa}	83.87 ± 7.13^{Aa}
L	1	72.10 ± 1.93^{AB}	71.65 ± 1.86^{AB}	72.91 ± 0.83^{B}	70.55 ± 0.44^{A}	71.96 ± 0.41^{AB}
	4	72.42 ± 1.81^{BC}	70.92 ± 0.72^{AB}	72.71 ± 0.61^{C}	69.47 ± 0.91^{A}	71.29 ± 0.84^{BC}
	8	71.63 ± 0.36^{BC}	70.85 ± 0.34^{AB}	72.60 ± 0.76^{C}	70.21 ± 1.36^{A}	71.51 ± 0.51^{BC}
a	1	-2.71 ± 0.53^{D}	-4.12 ± 0.49^{BC}	-5.65 ± 0.41^{A}	-3.93 ± 0.76^{C}	-4.90 ± 0.35^{AB}
	4	-2.91 ± 0.36^{E}	-4.57 ± 0.28^{C}	-5.76 ± 0.19^{A}	-3.86 ± 0.55^{D}	-5.05 ± 0.15^{B}
	8	-2.88 ± 0.18^{E}	-4.57 ± 0.37^{C}	-5.76 ± 0.25^{A}	-3.99 ± 0.56^{D}	-5.08 ± 0.03^{B}
b	1	25.14 ± 0.48^{BCb}	23.00 ± 0.71^{Aa}	25.14 ± 1.26^{BCa}	25.74 ± 0.46^{Cb}	24.34 ± 0.97^{Ba}
	4	24.49 ± 0.54^{Cab}	22.34 ± 0.21^{Aa}	24.60 ± 0.78^{Ca}	24.79 ± 0.40^{Ca}	23.66 ± 0.63^{Ba}
	8	24.28 ± 0.48^{BCa}	22.31 ± 0.29^{Aa}	24.73 ± 0.72^{BCa}	24.94 ± 0.29^{Ca}	23.99 ± 0.69^{Ba}

Capital letters (A-E) denote a significant difference between zerde sweets for the same storage day at the $p<0.05$ level.

Lowercase letters (a-b) denote a significant difference between the storage days for the same zerde sweets at the $p<0.05$ level.

The color values of the sweets were influenced by the presence of yellow and red pigments in the spices. While the most significant pigment responsible for the bright yellow-red hue of saffron is the crocin pigment [4], the substances that contribute to color formation in safflower spice are the "Carthamin" and "Carthamidin" pigments [6]. Turmeric contains curcumin, a naturally yellow-orange pigment [9].

3.3 Biological activity

The influences of different treatments and storage periods on total phenolic content were not significant ($p \geq 0.05$). The effect of zerde types on antioxidant activity was significant ($p < 0.05$) (Table 3). Zerde with safflower and turmeric exhibited the highest antioxidant activity during storage. Okur [15] found that storage time and the use of turmeric and saffron in the Muhallebi milk dessert increased antioxidant activity. These results align with our study. In a study on milk desserts produced by adding ginger in varying proportions, formulation differences did not affect the total phenolic content [22]. Curcuminoids are the primary antioxidant compounds in turmeric. Additionally, turmeric contains compounds that influence different antioxidant capacities, such as γ-terpinene, ascorbic acid, beta-carotene, beta-sitosterol, caffeic acid, campesterol, and camphene [23]. Safflower contains a variety of phenolic compounds, including gallic acid, chlorogenic acid, syringic acid, quercetin-3-galactoside, and epicatechin [24]. Ivanova et al. [25] reported that the total phenolic content of dairy desserts with encapsulated cornelian cherry, chokeberry, and blackberry juices varied between 4.12-14.53 mg GAE/100 g and 1.29-7.39 mg GAE/100 g on the 1st day and the 20th of storage, respectively. The antioxidant activity of high-protein, fat-free dairy reported by Kusio et al. [26] was higher when compared to the present results. In a low-calorie milk dessert study using ginger and cinnamon extract, it was found that desserts using 0.4% ginger extract had greater antioxidant properties than other samples [27].

3.4 Textural properties

The effect of different spices on textural parameters was not significant ($p \geq 0.05$). Regarding the textural properties (except hardness), a significant change ($p < 0.05$) was observed with the storage period. The textural properties of zerde samples mainly decreased with storage time (Table 4).

This finding was consistent with the report by Kadağan and Arslan [13]. Cold storage promotes retrogradation in starch-based gels. Retrogradation influences the textural properties of the final product [28]. The functional properties of starch gel are affected by several factors, such as amylose content, the stiffness of the amylose matrix, the resilience of the remaining starch granules, and their interactions. Therefore, gel hardness could be associated with the amylose matrix and the filling effect of swollen starch granules [29]. In addition, heat treatment application and storage conditions can also affect the gel structure [30].

In the study on date pit puddings, it was stated that the hardness values were influenced by amylose content and the interactions of gelatinized starch fractions with the ingredients used in the pudding formulation.

The hardness, cohesiveness, springiness, adhesiveness, and gumminess of date pits pudding were measured as 0.28-0.63 N, 0.41-0.69, 8.63-9.80 mm, 0.73-1.17 mJ, and 0.16-0.41, respectively [29]. Interactions between the milk content and remaining zerde components (mainly starch) can also affect the textural properties of the samples [20].

Table 3. Total phenolic content (mg GAE/100 g zerde) and antioxidant activity (μmol TE/100 g zerde) of different zerde formulations during storage.

Properties	Storage period	S	SF	T	T-S	T-SF
Total	1	21.60±5.47	25.51±4.75	24.96±2.40	24.00±3.64	27.86±1.44
phenolic	4	21.83±3.13	21.99±4.20	21.32±4.10	23.43±2.35	22.34±3.95
Content	8	25.24±2.89	25.64±1.87	22.03±2.88	20.98±1.45	22.67±3.30
Antioxidant	1	1.00 ± 0.12^{A}	1.02 ± 0.41^{A}	1.21 ± 0.19^{A}	1.07 ± 0.18^{A}	1.33 ± 0.60^{A}
Activity	4	1.26 ± 0.70^{A}	1.27 ± 0.20^{A}	1.14 ± 0.44^{A}	1.24 ± 0.79^{A}	1.91 ± 0.78^{A}
	8	1.19 ± 0.20^{AB}	0.97 ± 0.33^{A}	1.23 ± 0.60^{AB}	1.80 ± 0.96^{AB}	2.10 ± 0.46^{B}

Capital letters (A-B) denote a significant difference between zerde sweets for the same storage day at the $p<0.05$ level).

Table 4. Textural properties for five zerde samples during storage.

Properties	Storage period	S	SF	T	T-S	T-SF
Hardness	1	19.42±3.96	18.83±4.26	20.33±9.66	18.66±5.60	24.16±4.51
(g)	4	18.41±2.85	18.58±5.41	17.83±5.37	22.08±3.99	21.50±2.42
	8	16.50±3.27	16.00±1.97	15.66±6.47	19.66±1.63	19.25±4.26
Springiness	1	14.32 ± 1.08^{b}	12.76 ± 1.35^{a}	12.26 ± 2.27^{a}	11.63 ± 2.13^{a}	13.54 ± 3.41^{a}
(mm)	4	14.17 ± 0.89^{b}	13.59 ± 1.16^{a}	11.05 ± 3.28^{a}	13.25 ± 2.42^{a}	13.62 ± 1.17^{a}
	8	11.51 ± 1.18^{a}	12.30 ± 1.62^{a}	11.36 ± 2.48^{a}	11.73 ± 1.90^{a}	11.15 ± 2.57^{a}
Gumminess	1	11.31 ± 2.96^{b}	11.80 ± 2.33^{a}	11.58 ± 5.77^{a}	10.17 ± 3.40^{a}	13.03 ± 3.87^{b}
(g)	4	10.08 ± 1.02^{ab}	10.80 ± 2.85^{a}	8.58 ± 4.01^{a}	12.03 ± 1.60^{a}	11.65 ± 1.44^{ab}
	8	8.38 ± 1.39^{a}	9.39 ± 2.70^{a}	7.96 ± 3.03^{a}	9.16 ± 1.28^{a}	9.6 ± 1.99^{a}
Cohesiveness	1	0.56 ± 0.02^{b}	0.59 ± 0.05^{a}	0.56 ± 0.03^{a}	0.54 ± 0.09^{a}	0.50 ± 0.11^{a}
	4	0.55 ± 0.03^{b}	0.58 ± 0.07^{a}	0.48 ± 0.06^{a}	0.50 ± 0.06^{a}	0.54 ± 0.06^{a}
	8	0.51 ± 0.03^{a}	0.53 ± 0.05^{a}	0.51 ± 0.08^{a}	0.46 ± 0.07^{a}	0.50 ± 0.07^{a}
Chewiness	1	1.61 ± 0.52^{b}	1.35 ± 0.54^{a}	1.50 ± 0.96^{a}	1.14 ± 0.55^{a}	1.82 ± 0.88^{a}
(mJ)	4	1.40 ± 0.12^{ab}	1.46 ± 0.54^{a}	1.02 ± 0.70^{a}	1.57 ± 0.44^{a}	1.57 ± 0.29^{a}
	8	1.01 ± 0.21^{a}	1.05 ± 0.32^{a}	0.93 ± 0.47^{a}	1.07 ± 0.32^{a}	1.13 ± 0.31^{a}

Lowercase letters (a-b) denote a significant difference between the storage days for the same zerde sweets at the $p<0.05$ level.

Majzoobi et al. [20] reported that the gumminess value of milk desserts with added wheat germ varied between 47.58 g and 77.64 g, but the present findings were lower than these results. Chewiness indicates the amount of energy needed to chew food [31]. Chewiness values were lower than the results of Vidigal et al. [32]. Similar cohesiveness values were reported by Zarzycki et al. [33] in the dairy desserts with the addition oat gum concentration and carrageenan, who noted a range from 0. 491 to 0.647. These hardness and gumminess results were lower than those reported by Ganje et al. [34]. On the other hand, other textural properties are quite similar to the results of the saffron milk dessert [34].

3.5 Microstructure

Microstructure affects the textural properties of food and is of great interest [35]. Figure 1 shows the micrographs of the product obtained for five different formulations.

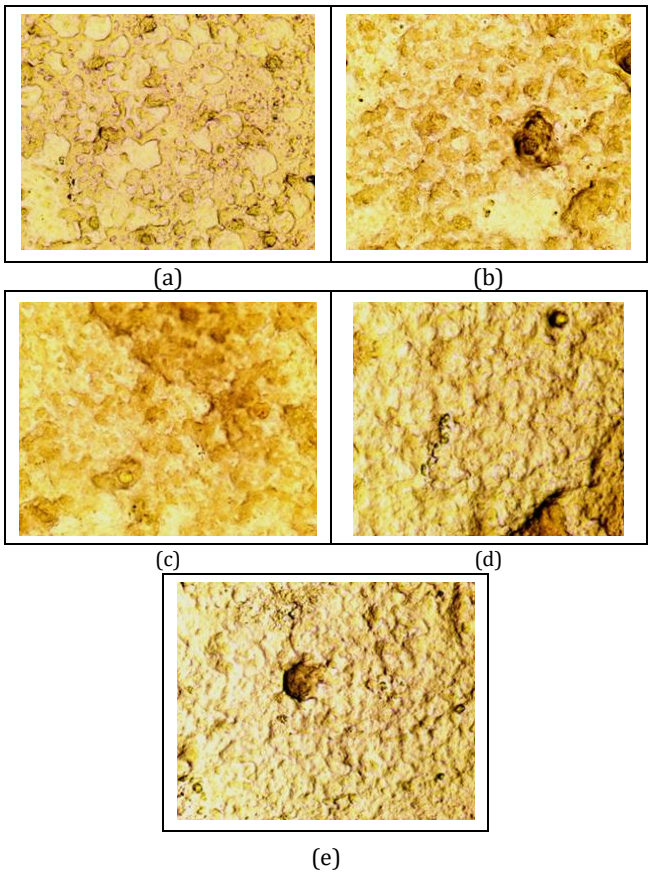


Figure 1. Image of zerde samples produced with different spices under a light microscope with a 10X objective (a): Zerde prepared by adding saffron (S). (b): Zerde prepared by adding safflower (SF). (c): Zerde prepared by adding turmeric (T). (d): Zerde prepared by adding turmeric and saffron (T-S). (e): Zerde prepared by adding turmeric and safflower (T-SF).

In a study on a custard-like soy-based dessert with guava pulp, the addition of soy extract and dry ingredients affected the microstructure. Researchers found that incorporating dry ingredients supported the network structure and that a correlation existed between water binding capacity and microstructure [36]. Alimi et al. [37] studied the effect of native or hydrothermally modified banana starch on the microstructure properties of corn starch custard paste. The micrographs exhibited similar homogenous, non-continuous gel network structures for all custard paste samples. In the study conducted on instant puddings with low glycemic index, it was stated that the irregular shapes and proteins seen in the microstructure were related to the process conditions and the ingredients used [38]. In our study, no significant differences were observed between the microstructures of the samples. The analysis of samples' textural structures demonstrated that the spice addition did not lead to statistically significant differences, supporting our view.

3.6 Volatile compounds

Aromatic components are one of the parameters affecting consumer preferences [39]. The release of flavor in foods can be influenced by various factors such as the nature (texture, particle size, viscosity), the amount of flavoring agents, food matrix (lipid, protein, sugar, pectin, etc.), and oral physiology (saliva release, chewing, breathing, oral cavity volume, mouth) [40]. A total of 28 volatile compounds were identified in the zerde samples (Table 5). The sample included esters, terpenes, alcohols, ketones, aldehydes, phenolics, and others. The number of volatile compounds was 24, 21, 7, 19, and 7 in the S, SF, T, T-S, and T-SF zerde samples.

Ethyl esters are primarily responsible for sweet and fruity flavors [41]. Ethyl acetate was present in all samples. In another study conducted on milk samples subjected to various heat treatments, Hougaard et al. [42] noted that volatile compounds were affected by these heat treatments. The amount of ethyl acetate was higher in instant infusion pasteurized samples compared to raw milk, high-temperature short-time pasteurized milk, and milk pasteurized at 85 °C for 30 seconds. It has been suggested that ethyl acetate may be formed due to the heat catalysis of ethanol and acetic acid. Lubber and Butler [43] investigated the effects of texture and temperature on aroma release in model milk desserts. The researchers conducted a kinetic study by considering 4 aroma components, namely isoamyl acetate, octan-2-one, ethyl hexanoate, and allyl hexanoate. The ester content of the S-and SF samples exceeded 46%. Sample T contained only ethyl acetate from the ester group. Studies in model systems show that esters can interact with macromolecules found in custard compositions [43].

Ketones are present in both raw milk and processing parameters [44]. They are characterized by distinctive odors, including fruity, floral, mushroom, or musty notes, and have low perception thresholds [45]. Table 5 shows that the ketone group was not detected in samples T and T-SF, while the majority of ketone compounds were detected in SF.

Acetaldehyde has a light, fresh, green, and strong odor. It may be derived from various compounds, such as fatty acids, glucose, and amino acids [44]. Acetaldehyde was identified in all samples. Safranal is the major compound in the saffron aroma [46]. As expected, safranal was determined in the S and T-S samples.

The number and amount of alcohol and epoxy compounds in the samples were also quite low. Cyclobutanol concentrations in the S and SF samples were recorded as 5.34 % and 0.55%, respectively.

Certain volatile phenols were identified in the samples. In this study, guaiacol was the main aroma compound in the zerde samples containing turmeric.

Table 5. Volatile compounds of zerde samples.

Compound (%)	S	SF	T	T-S	T-SF
Esters					
Ethyl acetate	44.33±3.14^{B}	39.15±3.96^{B}	1.87±0.42^{A}	0.93±0.21^{A}	0.53±0.14^{A}
Ethyl butyrate	1.47±0.10^{A}	1.53±0.11^{A}	n.d.	7.00±1.56^{B}	0.37±0.06^{A}
Ethyl hexanoate	0.39±0.06^{A}	0.22±0.03^{A}	n.d.	8.09±1.41^{B}	0.34±0.04^{A}
Hexyl formate	1.39±0.13	3.44±1.13	n.d.	1.19±0.73	n.d.
Butyl acetate	n.d.	1.66±0.15	n.d.	n.d.	n.d.
Vinyl acetate	n.d.	19.70±2.83	n.d.	n.d.	1.50±0.14
Ketones					
2-Pentanone	2.04±0.42^{B}	0.61±0.02^{A}	n.d.	0.36±0.04^{A}	n.d.
2-Heptanone	2.25±0.28^{A}	2.00±0.57^{A}	n.d.	3.65±0.42^{B}	n.d.
n-Octane	8.06±1.41^{B}	0.11±0.03^{A}	n.d.	n.d.	n.d.
2-Nonanone	0.79±0.14^{A}	23.90±3.96^{B}	n.d.	0.16±0.03^{A}	n.d.
2-undecanone	0.86±0.14^{A}	0.78±0.11^{A}	n.d.	2.44±0.28^{B}	n.d.
n-dodecane	1.07±0.17^{B}	0.21±0.03^{A}	n.d.	n.d.	n.d.
Aldehydes					
Acetaldehyde	1.65±0.28^{A}	0.63±0.14^{A}	0.44±0.14^{A}	27.62±4.80^{B}	1.75±0.21^{A}
Hexenal	0.57±0.14^{B}	0.14±0.03^{A}	n.d.	0.17±0.04^{A}	n.d.
Heptanal	0.62±0.14^{B}	0.16±0.03^{A}	n.d.	0.16±0.03^{A}	n.d.
Safranal	12.34±2.83^{B}	n.d	n.d.	1.07±0.28^{A}	n.d.
Alcohol					
Cyclobutanol	5.34±0.98^{B}	0.55±0.14^{A}	n.d.	n.d.	n.d.
Isoamyl alcohol	n.d.	1.18±0.14	n.d.	n.d.	1.29±0.28
Volatile Phenols					
Guaiacol	6.69±0.99	n.d.	94.33±4.39	42.80±4.38	94.21±4.24
Vanillin	2.14±0.05	3.58±0.10	n.d.	0.20±0.02	n.d.
Terpene					
Limonene	0.89±0.07^{C}	0.16±0.03^{A}	0.24±0.04^{A}	0.64±0.10^{B}	n.d.
p-Cymene	0.50±0.05^{B}	n.d.	0.28±0.03^{A}	n.d.	n.d.
Calamenene	0.59±0.05	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Alpha Curcumene	4.36±1.26^{B}	0.18±0.03^{A}	n.d.	0.23±0.04^{A}	n.d.
Farnesol (Z,E-)	0.82±0.06^{B}	n.d.	n.d.	0.30±0.04^{A}	n.d.
aR-Turmerone	0.66±0.07^{B}	0.10±0.01^{A}	n.d.	0.17±0.03^{A}	n.d.
4-carene	n.d.	n.d.	0.29±0.02	n.d.	n.d.
Other 2,3-Epoxybutane	0.66±0.04^{A}	n.d.	2.55±0.57^{B}	2.78±0.58^{B}	n.d.

Capital letters (A-B) denote a significant difference between zerde sweets at the $p<0.05$ level.

n.d.: not detected.

Guaiacol (a medicinal phenol) had the most pungent aroma, characterized by its bitterness, phenolic notes, and smoky quality [39]. Kesen [39] identified 21 aroma compounds in turmeric. The researcher found that the 5 most abundant compounds in turmeric were determined as guaiacol, cuminic alcohol, isoamyl isobutyrate, α-curcumene and phenol, respectively. Guaiacol was determined all samples except SF sample. Vanillin was detected in the control sample, SF and T-S sample. Vanillin is one of the identified flavor components in saffron [47].

Terpenes are flavoring agents primarily found in plants. The terpenes found in milk originate from animal nutrition [41]. Additionally, terpenes can also be derived from plant materials added to dairy products [41, 48]. The highest concentration of a terpene compound was detected in the saffron sample. Terpene compounds were not identified in the T-SF sample. The most abundant terpene in the control sample was alpha-curcumene. The second most abundant terpene in the sample with saffron was limonene. Saffron is an excellent source of carotenoids and terpenes [49]. Turmeric rhizomes contain both mono- and sesquiterpenoid terpenoids [50]. The formulation and processing steps are believed to significantly impact the aroma compounds of zerde.

Martuscelli et al. [51] investigated the effect of fat content on seven aroma compounds (ethyl hexanoate, ethyl butanoate, benzyl acetate, ethyl 3-methyl butanoate, cis-3-hexenyl acetate, cis-3-hexenol, and hexanal) in strawberry-flavored milk desserts. In a study conducted on saffron-added cheese, 10 different aroma groups (aldehydes, ketones, alcohols, esters, sulfur compounds, terpenes, ethers, hydrocarbons, aromatic hydrocarbons, and others) were identified. In this study, it was determined that saffron-added and control cheeses had similar aroma profiles, except for the presence of safranal [52].

3.7 Sensory Properties

The findings indicated that the presence of different spices influenced the general acceptability of the zerde samples; however, statistical analysis revealed no significant difference between the zerde types ($p\geq0.05$). All sensory properties were significantly affected by the storage period (Table 6). Generally, the sensory properties of the samples were higher on the 4th day of storage compared to other days. There was a significant effect of various spices and storage time on the appearance and odor scores of zerde. The highest appearance score was recorded for the control on the 4th day. Compared to the other formulations, the zerde sample supplemented with turmeric powder exhibited the highest general acceptability on days 4 and 8 of the storage period. Conversely, the general acceptability scores of the samples were similar.

Choobkar et al. [53] found that as the amount of cinnamon powder increased, the appearance scores of puddings improved.

Table 6. Sensory properties for five zerde samples during storage.

Properties	Storage period	S	SF	T	T-S	T-SF
Appearance	1	4.79 ± 1.08^{ABab}	4.76 ± 1.12^{ABb}	4.67 ± 0.87^{ABa}	4.33 ± 1.28^{Aa}	4.98 ± 0.92^{Ba}
	4	5.07 ± 1.14^{Cb}	4.40 ± 1.10^{Aab}	5.02 ± 0.90^{Ca}	4.76 ± 0.82^{Bb}	4.69 ± 1.16^{Ba}
	8	4.26 ± 0.91^{ABa}	4.17 ± 1.06^{Aa}	4.57 ± 0.94^{BCa}	4.52 ± 1.07^{BCab}	4.90 ± 1.14^{Ca}
Color	1	4.74 ± 1.04^{a}	4.67 ± 1.22^{a}	4.71 ± 1.02^{a}	4.71 ± 0.89^{a}	5.12 ± 0.92^{a}
	4	5.33 ± 1.24^{b}	5.02 ± 0.96^{a}	5.21 ± 0.98^{b}	5.12 ± 0.80^{b}	5.12 ± 1.13^{a}
	8	4.52 ± 0.94^{a}	4.69 ± 0.87^{a}	4.69 ± 1.07^{a}	4.79 ± 0.95^{a}	4.76 ± 1.03^{a}
Odor	1	4.55 ± 1.15^{ABa}	4.67 ± 1.05^{ABa}	4.86 ± 0.93^{Ba}	4.21 ± 0.93^{Aa}	4.43 ± 1.13^{ABa}
	4	5.10 ± 1.06^{ABb}	5.02 ± 1.22^{ABa}	4.98 ± 1.32^{Aa}	5.10 ± 1.01^{ABb}	5.19 ± 0.99^{Bb}
	8	4.43 ± 0.77^{ABa}	4.81 ± 1.09^{Ba}	4.79 ± 0.93^{Ba}	4.17 ± 1.38^{Aa}	4.60 ± 1.01^{ABa}
Taste	1	4.55 ± 1.27^{ab}	4.43 ± 1.17^{a}	4.48 ± 1.13^{a}	4.90 ± 1.10^{a}	4.69 ± 1.16^{a}
	4	5.00 ± 1.27^{b}	5.02 ± 1.02^{b}	5.17 ± 1.17^{b}	5.02 ± 1.10^{a}	4.88 ± 1.45^{a}
	8	4.33 ± 1.05^{a}	4.69 ± 1.16^{ab}	5.07 ± 0.89^{b}	4.74 ± 1.06^{a}	4.45 ± 1.19^{a}
Consistency	1	4.93 ± 1.22^{b}	4.10 ± 1.27^{a}	4.29 ± 1.04^{a}	4.88 ± 0.97^{b}	4.76 ± 1.17^{b}
	4	4.86 ± 0.84^{b}	5.17 ± 1.10^{b}	5.00 ± 0.83^{b}	4.98 ± 1.05^{b}	4.64 ± 1.06^{b}
	8	4.14 ± 0.98^{a}	4.52 ± 0.94^{a}	4.67 ± 0.90^{a}	4.29 ± 1.18^{a}	4.17 ± 0.99^{a}
General acceptability	1	4.60 ± 1.15^{ab}	4.43 ± 1.09^{a}	4.38 ± 0.91^{a}	4.55 ± 0.94^{ab}	4.76 ± 1.14^{a}
	4	4.98 ± 1.10^{b}	5.02 ± 1.12^{b}	5.24 ± 0.82^{b}	4.88 ± 0.89^{b}	4.64 ± 1.27^{a}
	8	4.33 ± 0.82^{a}	4.62 ± 0.88^{ab}	4.98 ± 0.75^{b}	4.43 ± 0.89^{a}	4.55 ± 1.09^{a}

Capital letters (A-C) denote a significant difference between zerde sweets on the same storage day at the $p<0.05$ level.

Lowercase letters (a-b) denote a significant difference between the storage days for the same zerde sweets at the $p<0.05$ level.

In a study on puddings made with Iranian and Turkish saffron, it was found that as the quantity of saffron increased, both visual and oral consistency scores rose [54]. Kaur and Goswami [55] noted that the sensory scores of dairy desserts (Rasgulla) decreased with extended storage periods. Kumare et al. [56] reported that the overall acceptability of the milk dessert containing 0.8% black pepper powder and 1% turmeric powder was higher than that of other samples with black pepper-turmeric powder.

4 Conclusions

The combination of turmeric and safflower increased antioxidant activity, positively affecting zerde desserts. The b value was significantly influenced by different spices and storage periods ($p<0.05$). All zerde samples exhibited a similar total phenolic content. While cohesiveness, gumminess, and chewiness progressively decreased over the storage period, the hardness value was not significantly affected by storage($p\geq0.05$). The most volatile compounds were detected in zerde samples containing saffron and safflower. Guaiacol was identified as a major volatile compound in zerde samples that included turmeric. Aroma compounds such as aldehydes, alcohols, ketones, volatile phenols, and terpenes were recorded in zerde samples. The effects of spices on Hunter L, a and b values were significant. The results revealed that the spices (saffron, safflower, turmeric) played distinct roles as ingredients in the zerde dessert. Zerde samples with added turmeric exhibited higher taste, consistency, and general acceptability compared to other samples during storage, with the exception of the first day. Turmeric or formulations containing turmeric may be utilized in zerde production.

5 Acknowledgement

The authors would like to thank Pamukkale University Scientific Research Unit (Project No: 2016FEBE010) for financially supporting this study.

6 Author contribution statement

Nebahat Kıratlı was responsible for developing the idea, designing the experiments, conducting the literature review, and writing the initial draft of the article; Seher Arslan contributed to the study design, evaluated the results, examined the findings, and wrote and reviewed the article.

7 Ethics committee approval and conflict of interest statement

"There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared". "There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared".

8 References

[1] Işın PM. *Gülbeşeker Süt Tatlıları Tarihi*. 2. baskı, İstanbul, Türkiye, Yapı Kredi Yayınları, 2008.

[2] Mzabri I, Addi M, Berrichi A. "Traditional and modern uses of saffron (*Crocus sativus*)". *Cosmetics,* 6(4), 63, 2019.

[3] Heidarbeigi K, Mohtasebi SS, Foroughirad A, Ghasemi-Varnamkhasti M, Rafiee S, Rezaei K. "Detection of adulteration in saffron samples using electronic nose". *International Journal of Food Properties*, 18, 1391-1401, 2015.

[4] Kumar R, Singh V, Devi K, Sharma M, Singh MK, Ahuja PS. "State of art of saffron (*Crocus sativus* L.) agronomy:A comprehensive review". *Food Reviews International*, 25(1), 44-85, 2008.

[5] Delshad E, Yousefi M, Sasannezhad P, Rakhshandeh H, Ayati Z. "Medical uses of *Carthamus tinctorius* L.(safflower): a comprehensive review from traditional medicine to modern medicine". *Electronic Physician*, 10(4), 6672-6681, 2018.

[6] Mohammadi M, Tavakoli A. "Effect of harvest time of spring safflower (*Carthamus tinctorius* L.) florets on the production of red and yellow pigments". *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 7(5), 581-588, 2015.

[7] Turgumbayeva AA, Ustenova GO, Ross SA. "Volatile oil composition of *Carthamus tinctorius* L. the flowers grown in Kazakhstan". *Research Journal* of *Pharmaceutical, Biological* and *Chemical* Sciences, 6(2), 125-129, 2015.

[8] Kocaadam B, Şanlier N. "Curcumin, an active component of turmeric (*Curcuma longa*), and its effects on health". *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(13), 2889-2895, 2017

[9] Urošević M, Nikolić L, Gajić I, Nikolić V, Dinić A, Miljković V. "Curcumin: Biological activities and modern pharmaceutical forms". *Antibiotics*, 11(2), 135, 2022
[10] AOAC. *Official Methods of Analysis*. 15th edn. Arlington, USA, Association of Official Analysis Chemists, 1990.
[11] Metin M, Öztürk GF. *Süt ve Mamülleri Analiz Yöntemleri*. 7. Baskı, İzmir, Türkiye, Ege Meslek Yüksekokulu Basımevi, 2012.
[12] Cemeroğlu B. *Gıda Analizleri*. 1. Baskı, Ankara, Türkiye, Gıda Teknolojisi Derneği Yayınları, 2007.
[13] Kadağan S, Arslan S. "Effects of different hydrocolloid combinations and storage time on some properties of rice pudding samples". *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 28(7), 1045-1050, 2022.
[14] Peker H, Arslan S. "Effect of olive leaf extract on the quality of low fat apricot yogurt*". Journal of Food Processing and Preservation*, 41(5), e13107, 2017.
[15] Okur ÖD. "Utilization of natural plant sources in a traditional dairy dessert, Muhallebi". *Cogent Food & Agriculture*, 9(1), 2200601, 2023.
[16] Puri S, Dhillon B, Banura S. "To formulate and analyze brown rice puddings for its physico-chemical and sensory attributes". *Basic and Applied Sciences*,10, 1-12, 2014.
[17] Rodriguez Furlán LT, Campderrós ME. "The combined effects of Stevia and sucralose as sugar substitute and inulin as fat mimetic on the physicochemical properties of sugar-free reduced-fat dairy dessert". *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 10, 16-23, 2017.
[18] Kuttigounder D, Lingamallu JR, Bhattachary S. "Turmeric powder and starch: selected physical, physicochemical and microstructural properties". *Journal of Food Science*, 76(9), C1284-1291, 2011.
[19] Karimidastjerd A, Gulsunoglu-Konuskan Z, Olum E, & Toker OS. "Evaluation of rheological, textural, and sensory characteristics of optimized vegan rice puddings prepared by various plant-based milks". *Food Science & Nutrition*, 12(3), 1779-1791, 2024.
[20] Majzoobi M, Ghiasi F, Farahnaky A. "Physicochemical assessment of fresh chilled dairy dessert supplemented with wheat germ". *International Journal of Food Science & Technology*, 51(1), 78-86, 2016.
[21] Prasad W, Khamrui K, Mandal S, Badola R. "Effect of combination of essential oils on physicochemical and sensorial attributes of burfi in comparison with individual essential oil and BHA". *International Journal of Dairy Technology*, 71(3), 810-819, 2018.
[22] Pathirana GPS, Mudannayake DC. "Development of ginger (*Zingiber officinale*) incorporated functional milk dessert". *International Research Conference Sustainable Business Transition through Technology and Innovation*, Badulla, Sri Lanka, 07-09 February 2019.
[23] Shahidi F, Ambigaipalan P. "Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices: Antioxidant activity and health effects-A review". *Journal of Functional Foods*, 18, 820-897, 2015.
[24] Bacchetti T, Morresi C, Bellachioma L, Ferretti G. "Antioxidant and pro-oxidant properties of *Carthamus tinctorius*, hydroxy safflor yellow A, and safflor yellow A." *Antioxidants,* 9(2), 119, 2020.
[25] Ivanova M, Petkova N, Balabanova T, Ognyanov M, Vlaseva R. "Food design of dairy desserts with encapsulated Cornelian cherry, chokeberry and blackberry juices". *The Annals of the University Dunarea de Jos of Galati Fascicle VI - Food Technology*, 42(1), 137-142, 2018.
[26] Kusio K, Szafrańska JO, Radzki W, Sołowiej BG. "Effect of whey protein concentrate on physicochemical, sensory and antioxidative properties of high-protein fat-free dairy desserts". *Applied Sciences*, 10(20), 7064, 2020
[27] Hosseinipour SL, Ghanbarzadeh B, Mofid V, Soltani M, Hosseini H. "Low-calorie functional dairy dessert enriched by prebiotic fibers and high antioxidant herbal extracts: A study of optimization and rheological properties". *Food Science & Nutrition*, 12(10), 7829-7841, 2024.
[28] Moin A, Ali TM, Hasnain A. "Characterization and utilization of hydroxypropylated rice starches for improving textural and storage properties of rice puddings". *International Journal of Biological Macromolecules*, 105 (Part 1), 843-851, 2017
[29] Alambri MS, Mohamed AA, Hussain S. "High-fiber date pits pudding: formulation, processing and textural properties". *European Food Research and Technology,* 239, 755-763, 2014.
[30] El Bouchikhi S, Pagès P, El Alaoui Y, Ibrahimi A, Bensouda Y. "Syneresis investigations of lacto-fermented sodium caseinate in a mixed model system". *BMC Biotechnology*, 19, 57, 2019.
[31] Isık F, Ozgoren E, Sola Y. "Comparison of quality characteristics of muffins produced with einkorn, whole grain and white wheat flours". *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences,* 28(7), 1051-1061, 2022.
[32] Vidigal MCTR, Minim VPR, Ramos AM, Ceresino EB, Diniz MDMS, Camilloto GP, Minim LA. "Effect of whey protein concentrate on texture of fat-free desserts: sensory and instrumental measurements". *Ciência e Tecnologia de Alimentos (Campinas)*, 32(2), 412-418, 2012.
[33] Zarzycki P, Ciołkowska AE, Jabłońska-Ryś E, Gustaw W. "Rheological properties of milk-based desserts with the addition of oat gum and κ-carrageenan". *Journal of Food Science and Technology*, 56, 5107-5115, 2019.
[34] Ganje M, Sekhavatizadeh SS, Teymouri F, Gilkheiri M, Rahmani B. "Encapsulation of *Lacticaseibacillus rhamnosus* by extrusion method to access the viability in saffron milk dessert and under simulated gastrointestinal conditions". *Food Science & Nutrition*, 12(11), 9714-9726, 2024.
[35] Ahmad I, Xiong Z, Xiong H, Aadil RM, Khalid N, Lakhoo ABJ, Zia-ud-din, Nawaz A, Walayat N, Khan RS. "Physicochemical, rheological and antioxidant profiling of yogurt prepared from non-enzymatically and enzymatically hydrolyzed potato powder under refrigeration". *Food Science and Human Wellness,* 12(1), 69-78, 2023.
[36] Spada JC, Marczak LDF, Tessaro IC, Flôres SH, Cardozo NS. "Rheological modelling, microstructure and physical stability of custard-like soy-based desserts enriched with guava pulp. *CyTA- Journal of Food*, 13(3), 373-384, 2015.
[37] Alimi BA, Workneh TS, Oyeyinka SA. "Structural, rheological and in-vitro digestibility properties of composite corn-banana starch custard paste". *LWT-Food Science and Technology*, 79, 84-91, 2017.
[38] Naseer B, Naik HR, Hussain SZ, Qadri T, Dar BN, Amin T, Reshi M, Shafi F, Fatima T. "Development of low glycemic index instant *Phirni* (pudding) mix-its visco-thermal, morphological and rheological characterization". *Scientific Reports*, 12(1), 10710, 2022.

[39] Kesen S. "Characterization of aroma and aroma-active compounds of Turkish turmeric (*Curcuma longa*) extract". *Journal of Raw Materials to Processed Foods*, 1, 13-21, 2020.
[40] Baysal M, Elmacı Y. "Investigation of aroma release and rheological properties in dairy desserts with reduced fat content". *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology,* 8(6), 1331-1340, 2020.
[41] Gurkan H, Hayaloglu AA. "Volatiles and sensory characteristics of yogurt manufactured by incorporating basil (*Ocimum basilicum* L.)". *International Journal of Food Properties*, 20(1), S779-S789, 2017.
[42] Hougaard AB, Vestergaard JS, Varming C, Bredie WLP, Ipsen RH. "Composition of volatile compounds in bovine milk heat treated by instant infusion pasteurisation and their correlation to sensory analysis". *International Journal of Dairy Technology*, 64(1), 34-44, 2011.
[43] Lubbers S, Butler E. "Effects of texture and temperature on the kinetic of aroma release from model dairy custards". Food Chemistry, 123(2), 345-350, 2010.
[44] Papaioannou G, Kosma I, Badeka AV, Kontominas MG. "Profile of volatile compounds in dessert yogurts prepared from cow and goat milk, using different starter cultures and probiotics". *Foods*, 10(12), 3153, 2021
[45] Vítová E, Loupancová B, Zemanová J, Štoudková H, Březina P, Babák L. "Solid-phase microextraction for analysis of mould cheese aroma". *Czech Journal of Food Sciences*, 24(6), 268-274, 2006.
[46] Carmona M, Zalacain A, Salinas MR, Alonso GL. "A new approach to saffron aroma". *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 47, 145-159, 2007.
[47] Avila-Sosa R, Nevárez-Moorillón GV, Ochoa-Velasco CE, Navarro-Cruz AR, Hernández-Carranza P, Cid-Pérez TS "Detection of saffron's main bioactive compounds and their relationship with commercial quality". *Foods,* 11(20), 3245, 2022.
[48] Esen BN, Güneşer O, Akyüz S. "Evaluation of physico-chemical, microbiological and sensory properties with aroma profile of analogue cheeses produced from plant and dairy based protein sources". *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences,* 26(7), 1214-1222, 2020.
[49] El Midaoui A, Ghzaiel I, Vervandier-Fasseur D, Ksila M, Zarrouk A, Nury T, Khallouki F, Hessni AE, Ibrahimi SO, et al. "Saffron (*Crocus sativus* L.): A source of nutrients for health and for the treatment of neuropsychiatric and age-related diseases". *Nutrients*, 14(3), 597, 2022.
[50] Afzal A, Oriqat G, Akram Khan M, Jose J, Afzal M. "Chemistry and biochemistry of terpenoids from *Curcuma* and related species". *Journal of Biologically Active Products from Nature,* 3(1), 1-55, 2013.
[51] Martuscelli M, Savary G, Pittia P, Cayot N. "Vapour partition of aroma compounds in strawberry flavoured custard cream and effect of fat content". *Food Chemistry*, 108(4), 1200-1207, 2008.
[52] Licón CC, Carmona M, Berruga MI. "Volatile compounds in pressed ewes' milk cheese with saffron spice (*Crocus sativus* L.)". *International Journal of Dairy Technology*, 68(3), 399-408, 2015
[53] Choobkar N, Daraei Garmakhany A, Aghajani AR, Ataee M. "Response surface optimization of pudding formulation containing fish gelatin and clove (*Syzygium aromaticum*) and cinnamon (*Cinnamomum verum*) powder: Effect on color, physicochemical, and sensory attributes of the final pudding product". *Food Science & Nutrition*, 10(4), 1257-1274, 2022.
[54] Rahim SC, Ova G. "Changes in textural quality properties in puddings prepared by using Iranian and Turkish saffron through objective and subjective methods". *Academic Food Journal*, 14(4), 388-392, 2016.
[55] Kaur G, Goswami TK. "Effect of stevia level on chemical, microbiological, and sensory properties of dairy dessert (Rasgulla) at different storage periods and temperatures". *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(1), e14293, 2020.
[56] Kumare KD, Londhe GK, Anarthe NK. "Effect of black pepper (*Piper nigrum*) and turmeric (*Curcuma longa*) powder on sensory and rheological quality of burfi". *The Pharma Innovation Journal*, 11(1), 539-543, 2022.

Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 31(7), 1366-1373, 2025

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Formulation and development of a high-fiber snack bar with baobab and lupin flour

Baobab ve acı bakla unu ile yüksek lifli bir atıştırmalık barın formülasyonu ve geliştirilmesi

Ceren Oğuz[1], *Filiz Hazal*[1], *Hatice Neval Özbek*[1*], *Banu Koç*[2], *Fahrettin Göğüş*[1]

[1]Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, Gaziantep University, Gaziantep, Türkiye.
cerenoguz55@gmail.com, filizhazal@gmail.com, haticeneval@gantep.edu.tr, fahret@gantep.edu.tr

[2]Department of Gastronomy and Culinary Arts, Faculty of Tourism, Gaziantep University, Gaziantep, Türkiye.
banukoc@gantep.edu.tr

Received/Geliş Tarihi: 02.02.2025 Revision/Düzeltme Tarihi: 13.05.2025 doi: 10.5505/pajes.2025.67675
Accepted/Kabul Tarihi: 18.05.2025 Research Article/Araştırma Makalesi

Abstract

High protein, high energy, and nutritious snack bars are considered great supplemental meals. The purpose of this study was to develop a nutritionally balanced, high fiber, antioxidant-rich snack bar using baobab powder and lupin flour. Healthy snack bar formulations containing lupin flour alone and containing 10%, 30%, and 50% baobab instead of lupin flour were evaluated, and their sensory, textural and color properties were analyzed. Sensory analysis identified the snack bar with 10% baobab as the best formulation, achieving the highest ratings for sweetness, texture and overall acceptability. Further analyses were conducted to evaluate its composition, total phenolic content, and DPPH radical scavenging activity. The snack bar with 10% baobab demonstrated a well-balanced nutritional profile, with high protein content (19.11%), dietary fiber (20.6%), moderate fat content (12.42%), and low carbohydrate levels (48.95%). Additionally, it exhibited strong antioxidant properties, with a total phenolic content of 20.08 mg GAE/g and a DPPH radical scavenging activity of 50.66%. The results highlight the potential of incorporating baobab powder and lupin flour into snack bars to produce high-energy, nutrient-dense products with substantial health benefits, making them an appealing option for health-conscious consumers.

Keywords: Baobab powder, Sensory analysis, Lupin flour, Snack bar.

Öz

Yüksek proteinli, yüksek enerjili ve besleyici atıştırmalık barlar, harika ek öğünler olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmanın amacı, baobab tozu ve acı bakla unu kullanarak besinsel olarak dengeli, yüksek lifli, antioksidan açısından zengin bir atıştırmalık bar geliştirmektir. Yalnızca acı bakla unu içeren ve acı bakla ununun yerine sırasıyla %10, %30 ve %50 oranında baobab tozu içeren sağlıklı atıştırmalık bar formülasyonları değerlendirilmiş ve bunların duyusal, tekstürel ve renk özellikleri analiz edilmiştir. Duyusal analiz sonuçları, tatlılık, doku ve genel kabul edilebilirlik açısından en yüksek puanı alan %10 baobab içeren atıştırmalık barın en iyi formülasyon olduğunu ortaya koymuştur. Kompozisyon, toplam fenolik içeriği ve DPPH radikal bağlama aktivitesini değerlendirmek için ek analizler gerçekleştirilmiştir. %10 baobab içeren atıştırmalık bar, yüksek protein (%19.11), diyet lifi (%20.6), orta düzeyde yağ (%12.42) ve düşük karbonhidrat (%48.95) içeriği ile dengeli bir besin profili sergilemiştir. Ayrıca, 20.08 mg GAE/g toplam fenolik bileşik içeriği ve %50,66 DPPH radikal bağlama aktivitesi ile güçlü antioksidan özellikler göstermiştir. Sonuçlar, baobab tozu ve acı bakla ununun atıştırmalık barlara dahil edilmesinin yüksek enerjili, besin açısından zengin ve önemli sağlık faydaları sunan ürünler üretme potansiyelini vurgulayarak, bunları sağlık bilincine sahip tüketiciler için cazip bir seçenek haline getirmektedir.

Anahtar kelimeler: Baobab tozu, Duyusal analiz, Acı bakla unu, Atıştırmalık bar.

1 Introduction

Increasing awareness of health and wellness among consumers has driven demand for convenient, nutrient-dense food products that align with contemporary dietary needs. Snack bars, particularly those enriched with functional ingredients, have emerged as a popular choice due to their portability, energy content, and ability to deliver essential nutrients in a compact form. These products cater to the growing interest in plant-based and sustainable diets, offering an alternative to traditional snack foods often high in artificial additives and calories [1]. The integration of underutilized natural resources, such as baobab and lupin, into snack formulations presents an opportunity to develop innovative products that combine superior nutritional benefits with consumer appeal [2]-[4]. Baobab and lupin are recognized for their high fiber, protein, and antioxidant content, which can significantly enhance the health-promoting properties of snack bars while supporting sustainable food systems [5],[6].

Baobab (*Adansonia digitata* L.), a fruit native to Africa and other arid regions, is valued for its unique nutritional profile [6]. The fruit pulp is rich in dietary fiber, vitamin C, and polyphenols, offering antioxidant and functional health benefits. Baobab fruit pulp contains high amount of vitamin C (280-300 mg/100 g), almost ten times that of oranges, calcium (293 mg/100 g), phosphorus (96-118 mg/100 g) and soluble and insoluble dietary fibers (52%) [6]. Furthermore, baobab is highly sustainable due to its drought-tolerant nature, making it an appealing ingredient for addressing global food security concerns in dry regions [7]. Despite this potential, baobab remains underutilized in modern food applications, with limited research exploring its incorporation into ready-to-eat snack products. Its natural acidity and high pectin content make it a promising component for innovative formulations,

*Corresponding author/Yazışılan Yazar

particularly in snacks designed to provide functional health benefits [8].

Similarly, lupin (*Lupinus* spp.) seeds are emerging as a sustainable and nutrient-dense food source. With a protein content of approximately 40%, lupin is one of the most protein-rich legumes. Lupin seeds contain 30–40% dietary fiber, primarily consisting of insoluble fiber and they have a fat content in the range of 8% to 11.5% with a fat profile predominantly consists of mono- and polyunsaturated fats, omega 3, 6 and 9 fatty acids. They are also rich in minerals such as iron, magnesium, zinc, calcium and potassium; they contain vitamin A, B vitamins and vitamin E [5],[9]. These nutritional attributes make lupin suitable for various food applications, including baking and as a substitute for animal proteins in products such as meat, egg, or cheese analogues [5],[9],[10]. Additionally, its prebiotic properties support gut health by fostering beneficial microbiota, while its low glycemic index and bioactive compounds make it suitable for managing weight, blood glucose levels, and cardiovascular health risks [5],[11]. Despite these advantages, lupin remains underrepresented in mainstream food products, particularly in snack formulations. Combining lupin with complementary ingredients such as baobab could therefore significantly enhance the functional and sensory properties of snack bars.

Unlike conventional protein-enriched snack bars, this study focuses on the synergistic effects of baobab and lupin, two underutilized yet highly nutritious ingredients, in a single formulation. In this study, three distinct snack bar formulations were chosen to create various combinations of these components. Sensory evaluation, along with texture and color analysis, was conducted to assess taste, structural integrity, and visual appeal, ensuring alignment with consumer preferences. The results of these assessments guided the selection of the optimal formulation for the final product.

2 Materials and methods

2.1 Raw materials

Baobab powder was supplied from Naturiga, Türkiye (origin: Ghana). Apple juice concentrate was generously provided by Tasargem Company in Kozan, Adana, Türkiye. Flaxseed and pistachio powder purchased from a local market in Gaziantep, Türkiye, White Lupin was purchased from a local market in Denizli, Türkiye.

2.2 Preparation of snack bars

Three snack bar formulations were prepared by incorporating baobab powder at concentrations of 10%, 30%, and 50% (by weight of lupin flour and baobab powder). The control snack bar was prepared without any baobab powder. The proportions of the ingredients used in each formulation are presented in Table 1. Fresh lupin seeds were first soaked in water to facilitate the removal of their outer skins. The peeled lupin seeds were then dried for 4 h using a 10 kW, 27.12 MHz free-swinging transitional field electrode radio frequency (RF) drying system with a hot air (45 °C) heating unit (Sonar, İzmir, Türkiye). After drying, the lupin seeds were ground into flour using a high-speed grinder (Isolab Laboratory Mill 602, Interlab, Istanbul, Türkiye). Next, apple juice concentrate was combined with flaxseed at concentration of 15% (w/w) and mixed for different durations to evaluate the Brix value. Apple juice concentrate with flaxseed mucilage and flaxseeds were combined with baobab, lupin, and pistachio powders in the specified proportions (Table 1). The total weight of each snack bar was 25.74 g. The images of the formulated snack bars are given in Figure 1.

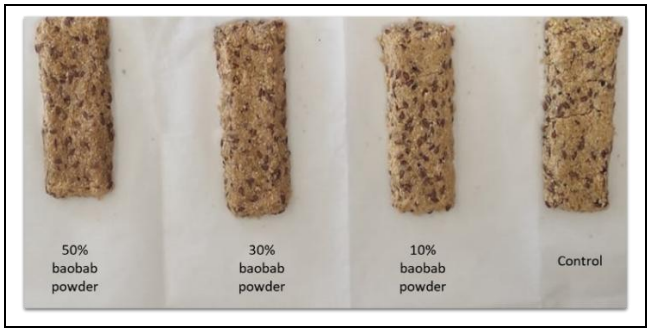


Figure 1. Images of formulated snack bars.

2.3 Soluble solids content

To evaluate the soluble solids content of the flaxseed-apple juice concentrate mixture, Brix values were measured using an ABBE refractometer (Atago, NAR-1T Liquid Model, Saitama, Japan). The mixture, containing 15% flaxseed (w/w), was analyzed at 0, 15, 30, 45, and 60-min intervals to assess the effect of mixing time on the soluble solid content.

2.4 Sensory analysis

The sensory quality of snack bars was evaluated using the nine-point hedonic scale. Plain water was provided to participants for palate cleansing between samples. The scale ranged from 1 (extremely dislike) to 9 (extremely like) [7]. A total of 30 untrained panelists (19 females and 11 males) participated in the sensory evaluation. The panel consisted of undergraduate and graduate students, as well as academic staff from the Food Engineering Department, Gaziantep University, Türkiye, aged between 20 and 60 years. Although the panelists were not formally trained in sensory analysis, they received brief instructions on the evaluation procedure prior to testing.

Table 1. Formulations of the snack bars.

Ingredients	Control	Snack bar with 10% baobab	Snack bar with 30% baobab	Snack bar with 50% baobab
Baobab powder (g)		1.01	3.04	5.06
Lupin flour (g)	10.12	9.11	7.08	5.06
Flaxseed (g)	2.70	2.70	2.70	2.70
Pistachio powder (g)	2.60	2.60	2.60	2.60
Apple juice concentration (g)	10.32	10.32	10.32	10.32

Each participant received four different snack bar formulations in a randomized order under controlled testing conditions (uniform lighting and neutral background). Participants rated the snack bars on the hedonic scale based on the following attributes: sweetness, sourness, fruitiness, appearance, texture, and overall acceptability.

2.5 Texture evaluation

The texture profile analysis (TPA) of the snack bars was done using the approach given by Mildner-Szkudlarz et al. [12], with minor modifications. A TA.XTplus Texture Analyzer (Stable Micro System Co. Ltd., Surrey, UK) with a 5 kg load cell and a cylindrical plunger probe 36 mm in diameter was used. Pre-test speed was set at 0.5 mm/s and 50% strain was applied during the measurement. Samples were prepared in a cylindrical shape with a diameter of 3.7 cm and sample thickness of 1.5 cm. Each sample was compressed twice to 50% of its original height. A total of 3 replicates per sample were analyzed to ensure statistical reliability. During the test, hardness, cohesiveness and chewiness were recorded.

2.6 Color Analysis

The color measurements of the snack bars were performed using a HunterLab ColorFlex (A60-1010-615 Model Colorimeter, HunterLab, and Reston VA, USA) with the different snack bar formulations. The samples were crushed, filled ¾ into the measuring head, and the color values were determined [20]. The L*a*b* color space, commonly known as CIELAB, was used to express the color changes. The color values were represented by the a* (greenness/redness), b* (blueness/yellowness), and L* (darkness/whiteness) values. Calibration was provided using the reference white tiles (L*= 93.41, a* = -1.12, b* = 1.07), the device was calibrated.

2.7 Analysis of nutritional composition and calculation of caloric value of the snack bar

The moisture, protein, and ash contents of the sample were analyzed following the standard procedures outlined by AOAC [13]. Fat content was measured by Soxhlet extraction using n-hexane as the solvent, in accordance with the AOCS method [14], without prior hydrolysis, over a period of 8 hours. Crude fiber content of the snack bar samples was evaluated using the standard procedure described in AOAC 991.43 [15]. Total sugar content was determined using the 3,5-dinitrosalicylic acid (DNS) method developed by Miller [16]. Total carbohydrate content of the snack bar was calculated by subtraction of the sums of the total fat, moisture, protein and ash from 100.

The total caloric value of the snack bar was calculated by multiplying the grams of fat, protein, and carbohydrates by their corresponding calorie values (4 calories per gram for protein and carbohydrates, and 9 calories per gram for fat) [17].

$$\begin{aligned} Total\ energy\ (kcal/100g) \\ = (carbohydrates\ (g) \times 4) \\ + (protein\ (g) \times 4) \\ + (fat\ (g) \times 9) \end{aligned} \quad (1)$$

2.8 Determination of total phenolic content

The total phenolic content of the samples was determined using the Folin–Ciocalteu colorimetric method, as described by Özbek et al. [18], with slight modifications. Briefly, 2 g of the snack bar sample was mixed with 20 mL of 70% methanol, and the mixture was shaken in an incubator at room temperature and 150 rpm for 60 min. The mixture was then centrifuged at 6000 x g for 15 min, and the supernatant was carefully collected. 0.2 mL aliquot of the extract was transferred into a 10 mL test tube, followed by the addition of 1 mL of 10-fold diluted Folin–Ciocalteu reagent (2N). After a 5-min incubation, 1.5 mL of 6% (w/v) sodium carbonate solution was added to the reaction mixture. The mixture was incubated in the dark at room temperature for 90 minutes. Absorbance was measured at
725 nm against a blank using a spectrophotometer (Optima SP 3000 Nano, Tokyo, Japan). The total phenolic content was expressed as gallic acid equivalents per gram of extract (mg GAE/g extract).

2.9 Antioxidant activity

The antioxidant activity of the 10% baobab snack bar extract was evaluated using the DPPH radical assay, following the method described previously [19]. Briefly, 0.1 mL of the snack bar extract in 70% methanol, was added to test tubes containing 3.9 mL of DPPH solution (6×10^{-5} mol/L) in methanol. The mixture was vortexed and incubated in the dark at 37°C for 30 min. After incubation, the absorbance of each sample was measured at 517 nm against a methanol blank. A control, containing 70% methanol instead of the bar extract, was used for comparison. The scavenging activity (%) was calculated using the following formula:

$$Scavenging\ activity\ (\%) = \frac{A_{control} - A_{sample}}{A_{control}} \times 100 \quad (2)$$

2.10 Statistical analysis

All experiments conducted in triplicate. The findings of analysis were presented as mean values ± standard deviation. The significance between the bar samples were statistically analyzed by using one-way analysis of variance (ANOVA) and compared by Tukey multiple range tests by using SPSS software (SPSS Inc., Chicago, IL, USA-Version 25).

3 Results and discussion

3.1 Evaluation of soluble dry matter in mucilage extraction

Flaxseeds at a concentration of 15% (w/w) were added into the apple juice concentrate to determine the optimal time of mucilage extraction. The Brix values of the mixture were measured at different time intervals. Since the mucilage concentration in apple juice concentrate directly impacts on the consistency, it plays a crucial role in determining textural properties of the final product.

The soluble solid content of the mixture was influenced by both the sugar content of the apple juice concentrate and the mucilage from the flaxseed. As mucilage was gradually extracted into the apple juice, a gel-like structure formed, contributing to increased soluble solids. This interaction not only enhances the sweetness of the snack bar but also improves its consistency. Similar findings have been reported in previous studies, where the incorporation of plant mucilages, such as flaxseed and chia seed, has been shown to increase the soluble solids content in various food products by contributing to water retention and gel formation [21],[22].

The Brix value of the mixture increased from 67.8 ± 0.28% and reached into the equilibrium (72.4 ± 0.50%) at 60 minutes of

mixing. This trend aligns with earlier studies indicating that mucilage extraction efficiency improves over time due to progressive hydration and diffusion process [23],[24]. Additionally, in a previous study on a snack bar formulation, which included an investigation of flaxseed mucilage extraction, reported that increasing extraction time enhanced polysaccharide solubilization, leading to a higher soluble solids content [25]. These findings further support the observed relationship between mixing time and soluble solid content in this study.

3.2 Sensory evaluation

The sweetness, sourness, fruitiness, chewiness, hardness, general acceptability, and appearance of three distinct snack bar formulations (10%, 30%, and 50% baobab powder) were evaluated and compared to a control snack bar (without baobab) during sensory analysis. These parameters were assessed to analyze and characterize the sensory attributes of the formulations, as presented in Table 2. The results showed that the snack bar with 10% baobab and 90% lupin flour received the highest ratings for sweetness, texture, appearance, and overall acceptability, while the snack bar with 50% baobab and 50% lupin flour received the lowest ratings in these parameters.

Statistical analysis revealed significant differences among formulations ($p<0.05$), particularly in sweetness and hardness. The control sample exhibited the highest chewiness and hardness, whereas increasing the baobab content resulted in a significant decrease in these textural properties ($p<0.05$). Sweetness increased with 10% baobab addition but declined at higher concentrations. Sourness and fruitiness were significantly enhanced with increasing baobab levels ($p<0.05$). However, overall acceptability was highest for the 10% baobab formulation, suggesting that moderate baobab addition provides an optimal balance between flavor and texture. These findings highlight the impact of baobab powder concentration on both sensory and consumer preference.

The sensory results were influenced by interactions between varying ratios of baobab powder and lupin flour. The snack bars with the highest sweetness ratings were the control and the 10% baobab snack bars, as sweetness was moderated by the baobab content. The sourness parameter was notably low in both the control and 10% baobab snack bars, likely due to the reduced influence of organic acids in baobab and the higher proportion of lupin flour, which can counteract sour flavors. As observed in the 50% baobab snack bar, the pronounced sourness is directly linked to the high content of baobab powder, known for its organic acid and vitamin C composition. This aligns with the findings of Netshishivhe et al. [26], who highlighted the influence of the baobab on enhancing the nutritional quality and sensory properties of snacks. The increased fruitiness in this formulation results from the synergistic effect of baobab powder and apple concentrate, creating a more pronounced citrus-like flavor.

The 10% baobab bar also received the highest ratings for chewiness, hardness, and appearance. These attributes were largely due to the smooth and cohesive texture contributed by lupin flour, which enhanced the bar's overall sensory appeal. In contrast, the snack bar with 50% baobab exhibited a fibrous or sandy texture, leading to its lower ratings in texture and overall acceptability. This result is consistent with the study by You et al. [27], which demonstrated that higher fiber content increases hardness, a key factor in sensory evaluations. Higher baobab content also affected hardness, as seen in the 50% baobab snack bar, which had the highest hardness scores among all formulations. This is in line with findings by Netshishivhe et al. [26], who noted that higher baobab concentrations contribute to increased hardness while enhancing specific nutritional benefits. However, the high fiber content likely diminished consumer preference for this texture. Sensory analysis confirmed that the 10% baobab snack bar achieved an optimal balance among the evaluated parameters, combining higher sweetness and texture ratings with favorable sourness and fruitiness levels. These results are consistent with those reported by Bergman [28], who found that moderate baobab concentrations could improve sweetness and overall acceptability without overwhelming sourness or altering the texture of the product negatively. Based on the combined sensory evaluations, the snack bar containing 10% baobab was identified as the most preferred formulation.

The textural properties of snack bars prepared with varying proportions of baobab powder, and lupin flour were evaluated based on hardness, cohesiveness, and chewiness, as summarized in Table 3. These parameters were significantly influenced by the composition of the formulations.

The snack bar containing 50% baobab exhibited significantly higher hardness (269.52 ± 1.15 N) compared to all other formulations. This increase in hardness is attributed to the higher fiber content of baobab powder, which also contributed to its fibrous and sticky structure. These findings are consistent with previous research [20], which reported that snack bars enriched with dietary fiber tend to exhibit higher levels of chewiness and hardness. However, the excessive hardness and chewiness of the 50% baobab snack bar likely diminished its sensory appeal, as reflected in the low ratings for texture, appearance, and overall acceptability in the sensory analysis.

Table 2. The statistical evaluation of various sensory parameters of a snack bar formulated with lupin flour and baobab powder.

	Control (without baobab)	Snack bar with 10% baobab	Snack bar with 30% baobab	Snack bar with 50% baobab
Sweetness	5.66 ± 0.57^{b}	7.13 ± 0.89^{a}	5.3 ± 0.95^{b}	3.36 ± 1.47^{c}
Sourness	1.33 ± 0.68^{d}	3.43 ± 1.54^{c}	5.96 ± 0.96^{b}	7.5 ± 1.38^{a}
Fruitiness	7.66 ± 0.92^{a}	3.83 ± 1.45^{c}	5.1 ± 1.15^{b}	7.16 ± 1.20^{a}
Chewiness	7.54 ± 0.57^{a}	8.13 ± 0.95^{a}	6.73 ± 1.08^{b}	4.96 ± 1.29^{c}
Hardness	2.53 ± 0.84^{b}	2.04 ± 0.71^{c}	4.56 ± 0.57^{a}	7.22 ± 1.06^{a}
Overall Acceptability	5.33 ± 1.02^{b}	7.1 ± 0.95^{a}	6.46 ± 1.35^{b}	4.86 ± 1.47^{c}
Appearance	5.66 ± 0.57^{b}	7.16 ± 1.05^{a}	5.73 ± 1.00^{b}	4.23 ± 1.38^{c}

Values are presented as mean ± standard deviation. Superscript letters (a, b, c, d) indicate statistically significant differences between the samples for each parameter in lines ($p < 0.05$).

Table 3. Texture profile evaluation of snack bars.

Formulations	Hardness (N)	Cohesiveness	Chewiness (N)
Control	100.95±0.19^{a}	0.236±0.004^{b}	9.69±0.01^{c}
Snack bar with 10% baobab	121.39±1.11^{b}	0.250±0.010^{b}	13.42±1.12^{b}
Snack bar with 30% baobab	167.18±0.63^{c}	0.293±0.001^{a}	26.58±0.35^{a}
Snack bar with 50% baobab	269.52±1.15^{d}	0.317±0.020^{a}	61.86±1.18^{a}

Results mean ± standard deviation of triplicate analyses. Values in columns with different letters are significantly different ($p < 0.005$).

3.3 Textural profile of snack bars

In contrast, the snack bar containing 10% baobab demonstrated a balanced textural profile, with moderate hardness (121.39 ± 1.11 N) and chewiness (13.42 ± 1.12 N). Its cohesiveness (0.250 ± 0.01) suggests an appropriate structural integrity that complements consumer preferences for a smooth and consistent mouthfeel. These characteristics were reflected in the sensory analysis, where the 10% baobab snack bar received the highest ratings for texture, appearance, and overall acceptability. The sensory preferences for the 10% baobab snack bar were influenced by its textural balance, with chewiness and hardness contributing positively to the eating experience. These favorable textural attributes contributed to the overall consumer acceptance of the 10% baobab snack bar. Considering both sensory and textural evaluations, this formulation emerged as the most suitable option. Its balanced texture, moderate hardness, and cohesive structure provided an enjoyable mouthfeel, complementing its high scores in sweetness, appearance, and overall acceptability during sensory analysis. These findings are consistent with those of Santiago-Ramos et al. [29], who reported that moderate hardness enhances consumer acceptance.

3.4 Color analysis

Color analysis was conducted for all four snack bar formulations, and the corresponding color parameter values are presented in Table 4.

Table 4. The experimental values of color parameters for snack bars.

Samples	L*	a*	b*
Control	58.17±0.09^{b}	5.83±0.02^{b}	30.24±0.09^{b}
Snack bar with 10% baobab	61.71±0.34^{a}	7.74±0.34^{ab}	34.97±1.21^{a}
Snack bar with 30% baobab	53.94±0.37^{c}	8.71±0.37^{a}	29.37±0.03^{b}
Snack bar with 50% baobab	56.04±1.45^{bc}	7.17±1.45^{ab}	28.19±0.56^{b}

Results mean ± standard deviation of triplicate analyses. Values in columns with different letters are significantly different ($p < 0.05$).

The ratio of lupin flour to baobab powder plays a significant role in the lightness (L*), redness (a*), and yellowness (b*) values of snack bars. Formulations containing 30% and 50% baobab powder exhibited lower L* values and higher a* and b* values compared to the control and the 10% baobab formulation. The L* values indicated that the addition of 10% baobab powder increased the lightness of the snack bar compared to the control, likely due to the naturally light beige color of baobab powder. However, at higher concentrations, the L* values decreased. This trend may be related to the changes in water retention properties and possible Maillard reactions during processing, which could contribute to a darker appearance. These results highlight the complex interplay between ingredient composition and color development in snack bars. Furthermore, the snack bar with 10% product had the greatest value (34.97) of yellowness (b*), while the control, snack bar with 30%, and snack bar with 50% product had lower values, respectively. These findings are related to the lack or amount of lupin flour and baobab powder in the components of the snack bars. Color and sensory analysis findings are strongly correlated. Color is an important factor in sensory analysis in the consumer group. The overall acceptability and appearance perception of the items are significantly influenced by parameters including lightness (L*), redness (a*), and yellowness (b*). It has been found that the snack bar with 10% baobab had a high acceptance rate due to its bright and balanced color tone. The snack bar with 50% baobab has a lower acceptance and image criteria due to its deeper color tone.

These findings are consistent with the results of Netshishivhe et al. [26], who reported significant color changes with increasing baobab content. Additionally, the color values of the snack bar with %10 baobab were observed to be lighter and brighter than the color values of the baobab-containing snacks in the literature [30]. This may be attributed to the combined use of baobab powder, lupin flour, and pistachio powder in the formulation. The light and bright tone of the snack bar with 10% baobab may represent this product to the consumer group as a light, healthy, and nutritious snack bar. These findings highlight the importance of integrating sensory evaluation with instrumental data such as texture and color analysis, when selecting the optimal formulation. The snack bar with 10% baobab demonstrates a balance between consumer preferences and key quality attributes, ensuring structural integrity, appealing appearance, and consistent texture.

3.5 Proximate composition analysis and energy value of the snack bar

Based on the preliminary sensory, texture and color analyses, the snack bar with 10% baobab and 90% lupin flour (by weight of lupin flour and baobab powder) was selected as the optimal formulation for further nutritional and antioxidant evaluations. This concentration was found to best balance consumer acceptability and textural properties, and thus was chosen for detailed compositional analysis. The results obtained are presented in Table 5.

The snack bar with 10% baobab contained 12.42% fat, primarily due to the inclusion of pistachio powder and flaxseed. A similar fat content (10%) was reported by Mridula et al. [31] in a snack bar formulation containing 15% flaxseed, supporting the findings of this study. Similarly, moisture content of 18.24% aligns with moisture levels in other high-protein snack bar formulations, where moisture levels ranged from 11.22-30.38% [32],[33]. The ash content, representing the mineral composition, was 1.28%, reflecting the contribution of mineral-rich ingredients such as baobab and lupin flours.

Table 5. Energy, composition and bioactive properties of snack bar with 10% baobab.

Parameters	Snack bar with 10% baobab
Fat (%)	12.42±0.74
Moisture (%)	18.24±0.14
Ash (%)	1.28±0.05
Protein (%)	19.11±0.11
Total Sugar (%)	21.42±1.34
Dietary Fiber (%)	20.60±0.98
Carbohydrate (%)	48.95±0.63
Energy (kcal)	384.02
Total Phenolic Content (mg GAE/g sample)	20.08±0.29
DPPH Scavenging Activity (%)	50.66±0.40

Results mean ± standard deviation of triplicate analyses. The quantities of the ingredients are given on a wet basis.

The dietary fiber content was notably high at 20.60%, placing this snack bar at the upper range of fiber-rich snack bars (15–22%) as reported in a previous study [32]. This higher fiber level is largely due to the combined effects of baobab powder (rich in pectin), lupin flour, and flaxseed, all of which are known for their fiber content. Such fiber levels support digestive health and promote satiety, making the product particularly suitable for health-conscious consumers. Moreover, the dietary fiber level surpasses those reported in other studies, where values ranged from 5.12% to 9.06% [20]. The results are consistent with Chiacchio et al. [34], who also reported a significant contribution of baobab powder to dietary fiber levels.

The carbohydrate content of 48.95% is relatively low compared to similar snack bars in earlier studies, where carbohydrate levels ranged from 55.24% to 69.03% [20],[33]. This can be attributed to the high inclusion of protein- and fiber-rich ingredients like baobab powder, lupin flour, and flaxseed. The addition of apple juice concentrate contributed to the carbohydrate content while enhancing energy density of the snack bar.

The total energy value of the snack bar was calculated as 384.02 kcal per 100 g, consistent with energy ranges reported by Alfheeaid et al. [33] (376–378 kcal/100 g). This makes the snack bar suitable for individuals seeking a nutritious and balanced energy source. Compared to Singh et al. [20], where the energy content were in the range of 316.14 - 332.78 kcal per 100 g, this snack bar offers higher energy content due to its well-balanced composition of protein, fat, and carbohydrates.

The snack bar with 10% baobab appeared that it provided similar levels of dietary fiber value, lower levels of carbohydrate value, and greater protein value as compared to previous studies [30]. The composition analysis of the snack bar with 10% baobab reveals a profile with high protein and sugar levels and moderate fat content, which is influenced by the contents of snack bar.

3.6 Bioactive properties

The bioactive properties of the snack bar formulated with 10% baobab powder were evaluated in terms of total phenolic content and DPPH radical scavenging activity, as presented in Table 5. The total phenolic content was 20.08±0.29 mg GAE/g. The high levels of phenolic compounds in the snack bar are primarily due to the natural antioxidant sources of flaxseed, pistachio, lupin flour and baobab powder. These ingredients are known to significantly contribute to phenolic content, thereby enhancing the health-promoting properties of the snack bar. The DPPH radical scavenging activity was found to be 50.66±0.40%. This activity reflects the synergistic effects of baobab powder, flaxseed, lupin flour and pistachio nut in the formulation. These ingredients provide a robust antioxidant profile, making the snack bar an excellent choice for individuals seeking functional foods with health benefits, highlighting the significant contribution of the selected ingredients to its antioxidant properties. Moreover, the DPPH scavenging activity reported in this study exceeds the values found in previous studies [20],[35], confirming the superior antioxidant capacity of this formulation. The combination of high phenolic content and strong radical scavenging activity underscores the formulation's potential as a functional food product with considerable health benefits. These results demonstrate that the snack bar with 10% baobab not only offers nutritional advantages but also delivers enhanced antioxidant properties due to the carefully selected plant-based ingredients. In comparison with existing products in the literature, this formulation shows promise as a health-promoting and nutrient-rich snack option [20],[35].

4 Conclusions

This study evaluated the nutritional composition, antioxidant activity, and sensory properties of a healthy snack bar formulated primarily with baobab powder and lupin flour. The results demonstrated both the nutritional benefits and potential consumer appeal of this novel snack bar. The sensory evaluation, alongside texture and color analysis, showed that the snack bar with 10% baobab received the highest ratings for sweetness, texture, overall acceptability, and appearance, outperforming the formulations with 30% and 50% baobab, which scored lower in these attributes. The variations in sensory characteristics were attributed to the differing proportions of baobab and lupin flour in the formulations. Additionally, the bioactive properties of the snack bar, including its high phenolic compound content and antioxidant activity, were found to be significantly enhanced, with values surpassing those of similar products in the literature. The integration of sensory evaluation with instrumental texture and color analysis played a crucial role in identifying the optimal formulation. The snack bar with 10% baobab demonstrated a well-balanced nutritional profile, with high fiber, protein, and mineral content, as well as moderate fat and low carbohydrate levels, making it a suitable option for health-conscious consumers. In addition to its nutritional composition, the snack bar's rich antioxidant activity and functional attributes underscore its potential as a nutrient-dense, health-promoting food. The findings contribute to the growing interest in plant-based snack bars, particularly those enriched with baobab powder, lupin flour, and flaxseed, as part of the emerging trend for nutritious, functional foods. Future studies should focus on optimizing the formulation by incorporating other functional ingredients and evaluating the shelf-life and stability of the snack bar. Further research on the relationships between the bioactive components and their health benefits will also be valuable in supporting the development of similar functional snack products.

5 Author contribution statements

Ceren Oğuz: Data curation, Investigation, Writing-original draft, Visualization. Filiz Hazal: Methodology, Validation, Conceptualization, Writing-review & editing. Hatice Neval Özbek: Methodology, Validation, Conceptualization, Writing -

review & editing. Banu Koç: Conceptualization, Writing - review & editing. Fahrettin Göğüş: Conceptualization, Methodology, Supervision, Writing-review & editing.

6 Ethics committee approval and conflict of interest statement

Ethical approval for the study was obtained from Gaziantep University Science and Engineering Ethics Committee dated 23 February 2024 and numbered E-87841438-050.99-459395. The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

7 Kaynaklar

[1] Umme H, Ashadujjaman RM, Mehedi HM, Afroz TM, Delara A, Rahman MMA. "Nutritional, textural, and sensory quality of bars enriched with banana flour and pumpkin seed flour". *Foods and Raw Materials*, 9(2), 282-289, 2021.

[2] Aliani M, Ryland D, Pierce GN. "Effect of flax addition on the flavor profile of muffins and snack bars". *Food Research International*, 44, 2489–2496, 2011.

[3] Darr D, Chopi-Msadala C, Namakhwa CD, Meinhold K, Munthali C. "Processed baobab (*Adansonia digitata* L.) food products in malawi: from poor men's to premium-priced specialty food?". *Forests*, 11, 698, 2020.

[4] Ricklefs-Johnson K, Johnston CS, Sweazea KL. "Ground flaxseed increased nitric oxide levels in adults with type 2 diabetes: A randomized comparative effectiveness study of supplemental flaxseed and psyllium fiber". *Obesity Medicine*, 5, 16–24, 2017.

[5] Bryant L, Rangan A, Grafenauer S. "Lupins and Health Outcomes: A Systematic Literature Review". *Nutrients*, 14(2), 327, 2022.

[6] Rahul J, Jain MK, Singh SP, Kamal RK, Naz A, Gupta AK, Mrityunjay SK. "Adansonia digitata L. (baobab): a review of traditional information and taxonomic description". *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 5(1), 79–84, 2015.

[7] Momanyi D, Owino W, Makokha A. "Formulation, nutritional and sensory evaluation of baobab based ready-to-eat sorghum and cowpea blend snack bars". *Scientific African*, 7, e00215, 2020.

[8] Silva ML, Rita K, Bernardo MA, Mesquita MFD, Pintão, AM, Moncada M. "Adansonia digitata L. (Baobab) bioactive compounds, biological activities, and the potential effect on glycemia: a narrative review". *Nutrients*, 15, 2170, 2023.

[9] Prusinski J. "White lupin (Lupinus albus L.)-nutritional and health values in human nutrition-a review". *Czech Journal of Food Sciences*, 35, 95–105, 2017.

[10] van de Noort M. *Lupin: An Important Protein and Nutrient Source, in: Sustainable Protein Sources*. Editors: Nadathur S, Wanasundara JPD, Scanlin L. Sustainable Protein Sources, 219–239, Kidlington, Oxford, United Kingdom, Elsevier, 2024.

[11] Malekipoor R, Johnson SK, Bhattarai RR. "Lupin kernel fibre: nutritional composition, processing methods, physicochemical properties, consumer acceptability and health effects of ıts enriched products". *Nutrients*, 14(14), 2845, 2022.

[12] Mildner-Szkudlarz S, Bajerska J, Górnaś P, Segliņa D, Pilarska A, Jesionowski T. "Physical and bioactive properties of muffins enriched with raspberry and cranberry pomace powder: a promising application of fruit by-products rich in biocompounds". *Plant Foods for Human Nutrition*, 71, 165–173, 2016.

[13] Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists. "Moisture in dried fruits, Ash of flour, Determination of protein content in food". Gaithersburg, MD, USA, AOAC 934.06, AOAC 923.03, AOAC 945.18-B, 2019.

[14] American Oil Chemists' Society. "Rapid determination of oil/fat utilizing high-temperature solvent extraction". Urbana, IL, USA, Am 5-04, 2017.

[15] Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists. "Total, soluble, and insoluble dietary fibre in foods". Gaithersburg, MD, USA, AOAC 991.43, 1999.

[16] Miller GL. "Modified DNS method for reducing sugars". *Analytical Chemistry*, 31(3), 426–428, 1959.

[17] Merrill AL, Watt BK. "Energy value of foods: basis and derivation". Human Nutrition Research Branch, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, Washington, USA, Agriculture Handbook, 74, 1955.

[18] Özbek HN, Halahlih F, Göğüş F, Koçak Yanık D, Azaizeh H. "Pistachio (Pistacia vera L.) Hull as a potential source of phenolic compounds: evaluation of ethanol–water binary solvent extraction on antioxidant activity and phenolic content of pistachio hull extracts". *Waste and Biomass Valorization*, 11, 2101–2110, 2020.

[19] Azaizeh H, Halahlih F, Najami N, Brunner D, Faulstich M, Tafesh A. "Antioxidant activity of phenolic fractions in olive mill wastewater". *Food Chemistry*, 134, 2226–2234, 2012.

[20] Singh A, Kumari A, Chauhan AK. "Formulation and evaluation of novel functional snack bar with amaranth, rolled oat, and unripened banana peel powder". *Journal of Food Science and Technology*, 59, 3511–3521, 2022.

[21] Puligundla P, Lim S. "A review of extraction techniques and food applications of flaxseed mucilage". *Foods*, 11, 1677, 2022.

[22] Tosif MM, Najda A, Bains A, Kaushik R, Dhull SB, Chawla P, Walasek-Janusz M. "A comprehensive review on plant-derived mucilage: characterization, functional properties, applications, and ıts utilization for nanocarrier fabrication". *Polymers (Basel)*, 13, 1066, 2021.

[23] Fabre JF, Lacroux E, Valentin R, Mouloungui Z. "Ultrasonication as a highly efficient method of flaxseed mucilage extraction". *Industrial Crops and Products,* 65, 354-360, 2015.

[24] Nazir S, Wani IA, Masoodi FA. "Extraction optimization of mucilage from Basil (Ocimum basilicum L.) seeds using response surface methodology". *Journal of Advanced Research,* 8(3), 235-244, 2017.

[25] Erarslan S. Production of a Healthy Snack Bar. MSc Thesis, Gaziantep University, Gaziantep, Türkiye, 2019.

[26] Netshishivhe M, Omolola AO, Beswa D, Mashau ME. "Physical properties and consumer acceptance of maize-baobab snacks". *Heliyon*, 5, e01381, 2019.

[27] You XY, Ding Y, Bu QY, Wang QH, Zhao GP. "Nutritional, textural, and sensory attributes of protein bars formulated with mycoproteins". *Foods*, 13, 671, 2024.
[28] Bergman, D, Wikner O. Development of a Semisolid, Baobab-based Protein Snack. MSc Thesis, Lund University, Lund, Sweeden, 2022.
[29] Santiago-Ramos R, Silva CLM, Ramos IN. "Modelling and optimization of the processing of a healthy snack bar made of grape and tomato pomaces". *Foods*, 11, 2676, 2022.
[30] Geppert, B. Development of a Fibre-Rich Snack Made From Baobab Fruit Pulp. MSc Thesis, Lund University, Lund, Sweeden, 2024.
[31] Mridula D, Singh KK, Barnwal P. "Development of omega-3 rich energy bar with flaxseed". *Journal of Food Science and Technology,* 50(5), 950-957, 2013.
[32] AlJaloudi R, Al-Dabbas MM, Hamad HJ, Amara RA, Al-Bashabsheh Z, Abughoush M, Choudhury IH, Al-Nawasrah, BA, Iqbal S. "Development and characterization of high-energy protein bars with enhanced antioxidant, chemical, nutritional, physical, and sensory properties". *Foods*, 13, 259, 2024.
[33] Alfheeaid HA, Barakat H, Althwab SA, Musa KH, Malkova D. "Nutritional and physicochemical characteristics of ınnovative high energy and protein fruit- and date-based bars". *Foods*, 12, 2777, 2023.
[34] Chiacchio MF, Tagliamonte S, Visconti A, Ferracane R, Mustafa A, Vitaglione P. "Baobab-fruit shell and fibrous filaments are sources of antioxidant dietary fibers". *Molecules*, 27, 5563, 2022.
[35] Irshad Z, Aamir M, Akram N, Asghar A, Saeed F, Ahmed A, Afzaal M, Ateeq H, Shah YA, Faisal Z, Khan, MR, Busquets R, Teferi Asres D. "Nutritional profiling and sensory attributes of sesame seed-enriched bars". *International Journal of Food Properties*, 26, 2978–2994, 2023.