NÖHÜ MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ
NOHU JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

ISSN: 2564-6605

Cilt: 14 Sayı: 3 2025

Volume: 14 Issue: 3 2025

www.ohu.edu.tr/muhendislikfakultesi
www.ohu.edu.tr/facultyofengineering

https://dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh
https://dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
ISSN: 2564-6605
Cilt/Volume: 14 Sayı/Issue: 3 2025
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Dergi Sahibi/*Journal Owner*
Prof. Dr. Murat Barut
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dekanı, Türkiye/
Niğde Ömer Halisdemir University, Dean of Engineering Faculty, Türkiye

Baş Editör/*Editor-in-Chief*
Prof. Dr. Mustafa Sarıdemir
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/***Niğde Ömer Halisdemir University, Türkiye***

Yardımcı Editörler/*Associate Editors*
Prof. Dr. Mustafa Korkanç
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Türkiye*
Doç. Dr./*Assoc. Prof. Dr.* Firdevs Uysal
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Türkiye*
Doç. Dr./*Assoc. Prof. Dr.* Ahmet Şakir Dokuz,
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Türkiye*

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
ISSN: 2564-6605
Cilt/Volume: 14 Sayı/Issue: 3 2025
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Yayın Danışma Kurulu/*Editorial Advisory Board*

Prof. Dr. Adnan Görür
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Türkiye*

Prof. Dr. Metin Yıldırım
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Türkiye*

Prof. Dr. Murat Gökçek
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Türkiye*

Prof. Dr. Fahrettin Öztürk
Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Türkiye/*Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Türkiye*

Prof. Dr. Muhammad Imran Asghar
Hubei Üniversitesi, Çin/Hubei University *University of Hubei, China*

Prof. Dr. Ceyhun Karpuz
Pamukkale Üniversitesi, Türkiye/*Pamukkale University, Türkiye*

Prof. Dr. Cengiz Duran Atiş
Erciyes Üniversitesi, Türkiye/*Erciyes University, Türkiye*

Prof. Dr. Okan Karahan
Erciyes Üniversitesi, Türkiye/*Erciyes University, Türkiye*

Prof. Dr. Mustafa Alçı
Erciyes Üniversitesi, Türkiye/*Erciyes University, Türkiye*

Prof. Dr. Kenan Danışman
Erciyes Üniversitesi, Türkiye/*Erciyes University, Türkiye*

Prof. Dr. Kezban Candoğan
Ankara Üniversitesi, Türkiye/*Ankara University, Türkiye*

Prof. Dr. Mustafa İlbaş
Gazi Üniversitesi, Türkiye/*Gazi University, Türkiye*

Prof. Dr. Yonca Yüceer
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Türkiye/ *Çanakkale Onsekiz Mart University, Türkiye*

Prof. Dr. Farid Abed
Sharjah Amerikan Üniversitesi, B.A.E./ *Sharjah American University, U.A.E.*

Prof. Dr. Ghassan Abu-Lebdeh
Sharjah Amerikan Üniversitesi, B.A.E./ *Sharjah American University, U.A.E.*

Prof. Dr. Serter Atabay
Sharjah Amerikan Üniversitesi, B.A.E./ *Sharjah American University, U.A.E.*

Prof. Dr. Kazi Fattah
Sharjah Amerikan Üniversitesi, B.A.E./ *Sharjah American University, U.A.E.*

Prof. Dr. Süreyya Meriç Pagano
Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Türkiye/*Tekirdağ Namık Kemal University, Türkiye*

Prof. Dr. Filipe Figueiredo
Aveiro Üniversitesi, Portekiz/*Aveiro University, Portugal*

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
ISSN: 2564-6605
Cilt/Volume: 14 Sayı/Issue: 3 2025
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Editör Kurulu/ *Editorial Board*

Prof. Dr. Mustafa Sarıdemir (Baş Editör/*Editor-in-Chief*)	İnşaat Mühendisliği *Civil Engineering*
Prof. Dr. Mustafa Korkanç (Yardımcı Editör/*Co-Editor*)	Jeoloji Mühendisliği *Geological Engineering*
Doç. Dr. Firdevs Uysal (Yardımcı Editör/*Co-Editor*)	İnşaat Mühendisliği *Civil Engineering*
Doç. Dr. Ahmet Şakir Dokuz (Yardımcı Editör/*Co-Editor*)	Bilgisayar Mühendisliği *Computer Engineering*
Prof. Dr. Fehiman Çiner	Çevre Mühendisliği *Environmental Engineering*
Prof. Dr. Hakan Erdem	İnşaat Mühendisliği *Civil Engineering*
Prof. Dr. Zeliha Yıldırım	Gıda Mühendisliği *Food Engineering*
Prof. Dr. Sencer Buzrul	Gıda Mühendisliği *Food Engineering*
Prof. Dr. Emel Kızılkaya Aydoğan	Endüstri Mühendisliği *Industrial engineering*
Prof. Dr. Hasan Tangüler	Gıda Mühendisliği *Food Engineering*
Prof. Dr. Maciej Dutkiewicz	İnşaat Mühendisliği *Civil Engineering*
Prof. Dr. Bora Timurkutluk	Makine Mühendisliği *Mechanical Engineering*
Prof. Dr. Ali Özgün Ok	Geomatik Mühendisliği *Geomatics Engineering*
Prof. Dr. Yasin Kabalcı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği *Electrical Electronics Engineering*
Prof. Dr. Kutalmış Gümüş	Harita Mühendisliği *Geomatics Engineering*
Prof. Dr. Aydın Yeşildirek	Mekatronik Mühendisliği *Mechatronics Engineering*
Prof. Dr. Arzum Büyükkeklik	Endüstri Mühendisliği *Industrial Engineering*
Prof. Dr. Serkan Çayırlı	Maden Mühendisliği *Mining Engineering*
Doç. Dr. Rahim Hassanzadeh	Makine Mühendisliği *Mechanical Engineering*
Doç. Dr. Hatice İnan	Çevre Mühendisliği *Environmental Engineering*
Doç. Dr. Andaç Batur Çolak	Makine Mühendisliği *Mechanical Engineering*
Doç. Dr. Casen Panaitescu	Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği *Perolium and Natural Gas Engineering*
Doç. Dr. Emrah Zerdali	Elektrik-Elektronik Mühendisliği *Electrical Electronics Engineering*
Dr. Öğr. Üyesi Ehsan Noroozinejad	İnşaat Mühendisliği *Civil Engineering*
Dr. Öğr. Üyesi Hatice Sinem Şaş Çaycı	Üretim Mühendisliği *Manufacturing Engineering*

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
ISSN: 2564-6605
Cilt/Volume: 14 Sayı/Issue: 3 2025
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Mizanpaj Editörleri/*Layout Editors*

Dr. Öğr. Üyesi Tolga Kaynak	Harita Mühendisliği *Geomatics Engineering*
Arş. Gör. Dr. Emre Uçar	Makine Mühendisliği *Mechanical Engineering*
Arş. Gör. Dr. Katibe Sinem Coruk	Gıda Mühendisliği *Food Engineering*
Arş. Gör. Kıvanç Karacan	Mekatronik Mühendisliği *Mechatronics Engineering*
Arş. Gör. Metehan Bulut	İnşaat Mühendisliği *Civil Engineering*
Arş. Gör. Kübra Nur Gül	Elektrik-Elektronik Mühendisliği *Electrical Electronics Engineering*
Arş. Gör. Ayşe Erdoğmuş	Bilgisayar Mühendisliği *Computer Engineering*
Arş. Gör. Kemal Ulusoy	Çevre Mühendisliği *Enviromental Engineering*
Arş. Gör. Yasemen İnce Keser	Elektrik-Elektronik Mühendisliği *Electrical Electronics Engineering*
Arş. Gör. Yusuf Can Turanoğlu	Makine Mühendisliği *Mechanical Engineering*

Dil Editörleri/*Language Editors*

Doç. Dr. Fatih Çelik	İnşaat Mühendisliği *Civil Engineering*
Doç. Dr. Hande Baltacıoğlu	Gıda Mühendisliği *Food Engineering*
Doç. Dr. Hasan Erhan Yücel	İnşaat Mühendisliği *Civil Engineering*
Dr. Öğr. Üyesi Hamdi Muratçobanoğlu	Çevre Mühendisliği *Environmental Engineering*
Dr. Öğr. Üyesi Ömer Genç	Makine Mühendisliği *Mechanical Engineering*
Dr. Öğr. Üyesi Recep Yıldız	Elektrik-Elektronik Mühendisliği *Electrical Electronics Engineering*
Arş. Gör. Dr. Efgan Uğur	Bilgisayar Mühendisliği *Computer Engineering*

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
ISSN: 2564-6605
Cilt/Volume: 14 Sayı/Issue: 3 2025
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Yazışma Adresi
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Yayın Koordinatörlüğü, 51240 Niğde/Türkiye

Correspondence Address
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences Publishing Coordinatorship, 51240 Niğde/Türkiye

E-posta/*E-mail*: mbdergisi@ohu.edu.tr

İnternet sayfası/*Web page*: https://dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh

Dergi Bilgisi

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi (NÖHÜ) Mühendislik Bilimleri Dergisi, NÖHÜ Mühendislik Fakültesi tarafından 2012 yılından beri Türkçe veya İngilizce olarak yazılmış Orijinal Araştırma Makaleleri ve Derleme Makaleleri yayınlayan hakemli bir dergidir. Dergi, hiçbir aşamada yayın ücreti talep etmemektedir ve DergiPark sistemi üzerinden ücretsiz erişimli bir dergidir.

Publication information

Niğde Ömer Halisdemir University (NOHU) Journal of Engineering Sciences is a peer-reviewed journal that has published Original Research Articles and Review Articles written in Turkish or English since 2012 by NOHU Faculty of Engineering. The journal does not require any publication fee at any stage and is a free access journal from the DergiPark system.

Özetlenme, Dizinlenme/*Abstracting, Indexing*

Erişilebilirlik /*Accessibility*

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
ISSN: 2564-6605
Cilt/Volume: 14 Sayı/Issue: 3 2025
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

İÇİNDEKİLER/*CONTENTS*

Research Article /*Araştırma Makalesi*

An investigation on installed performances of VHF and UHF turnstile antennas on 3U CubeSat platforms

3U küp uydu platformlarında VHF ve UHF turnike antenlerinin kurulu performansları üzerine bir inceleme

***Orçun Kiriş**

827-836

Araştırma Makalesi/*Research Article*

3B yazıcılarda üretilmiş farklı renkli PLA malzemelerin mekanik ve optik özelliklerinin incelenmesi

Investigation of the mechanical and optical properties of different colored PLA materials produced by 3D printers

Mustafa Samet Özkara, Furkan Güneş, Erhan Baysal, Furkan Parmaksız, *Nergizhan Anaç, Oğuz Koçar

837-845

Research Article /*Araştırma Makalesi*

A practical study of multi-layer high gain U-slot printed antenna array design

Çok katmanlı yüksek kazançlı U-yarık anten dizisi tasarımının pratik bir çalışması

***Gülden Günay Bulut Öner, Asena Melike Çayan, Suad Başbuğ, Yasemin Altuncu**

846-854

Research Article /*Araştırma Makalesi*

Investigation of the effect of dip coating with silica reinforced epoxy composite on the mechanical properties of 3D printed PLA materials

3B baskılı PLA malzemelerin silika takviyeli epoksi kompozit ile daldırmalı kaplanmasının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi

***İbrahim Aslan**

855-864

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Dondurarak kurutulmuş bal tozu üretimi; fizikokimyasal ve teknolojik özelliklerinin belirlenmesi

Production of freeze-dried honey powder; determination of its physicochemical and technological properties

***Şeyda Yanardağ Karabulut, Gülce Bedis Kaynarca, Hatice Şanlıdere Aloğlu, Harun Uran**

865-873

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Derin öğrenme tabanlı SNR kestirimi: Durum çalışması

Deep learning based SNR estimation: Case study

***Merih Leblebici, Ali Çalhan**

874-886

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Orta yükseklikteki betonarme binalarda tuğla dolgu duvara bağlı yumuşak kat oluşumu

Soft story formation due to brick infill walls in mid-rise reinforced concrete buildings

***Kayra Can Uçar, Emre Akın, İlker Fatih Kara**

887-898

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
ISSN: 2564-6605
Cilt/Volume: 14 Sayı/Issue: 3 2025
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Derin öğrenme için otomatik görüntü veri seti oluşturma düzeneği tasarımı ve ceviz cinslerine uygulanması

Design of an automatic image dataset generator for deep learning and its application to walnut species

***Cihat Özil, Mürsel Önder**

899-906

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Büyük ölçekli konveks ve konveks olmayan ekonomik güç dağıtım problemleri için artırımlı sosyal öğrenme tabanlı diferansiyel gelişim algoritmaları

Incremental social learning-based differential evolution algorithms for large-scale convex and nonconvex economic power dispatch problems

***Serdar Özyön**

907-931

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Eş atomlu NiTi şekil hafızalı alaşımların geleneksel hızlarda frezelenmesinde işlenebilirlik performansı

Machinability performance when milling shape memory alloys at conventional speeds

***Eren Kaya, İrfan Kaya**

932-936

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Lomax sönümlenmeli kanalların etkin verimlilik analizi

Effective throughput analysis of Lomax fading channels

Mehmet Bilim, *Yasin Kabalcı

937-942

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Tesisat boşluklu çelik kirişlerin çeşitli yöntemlerle güçlendirilmesinin yapısal performans üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi

Evaluation of the effects of strengthening steel beams with service hole by various methods on structural performance

Emin Battal, *Mehmet Fethi Ertenli, Şenol Gürsoy

943-956

Research Article /*Araştırma Makalesi*

Development and characterization of Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM) rubber reinforced by green material lignin

Yeşil malzeme lignin ile güçlendirilmiş Etilen Propilen Dien Monomer (EPDM) kauçuğunun geliştirilmesi ve karakterizasyonu

***Sibel Dikmen Küçük**

957-964

Research Article /*Araştırma Makalesi*

Investigation of genetically optimized pixel monopole patch antennas for miniaturization and wideband applications

Minyatürleştirme ve geniş bant çalışmaları için genetik olarak optimize edilmiş piksel monopol yama antenlerin incelemesi

***Çağatay Aydın**

965-973

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
ISSN: 2564-6605
Cilt/Volume: 14 Sayı/Issue: 3 2025
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Research Article /*Araştırma Makalesi*

Safety distance control approach in moving block signaling systems

Hareketli blok sinyalizasyon sistemlerinde emniyet mesafesi kontrolü yaklaşımı

***Ertuğrul Ateş, İlker Üstoğlu**

974-980

Araştırma Makalesi /*Research Article*

Robotik süreç otomasyonu ile üniversite süreçlerinin dönüşümü: Erciyes Üniversitesi örneği

Transformation of university processes with robotic process automation: The case of Erciyes University

***Tayyip Özcan, Münire Tuğba Şimşek**

981-989

Research Article /*Araştırma Makalesi*

Adaptation of a comprehensive simplification method to the Adaptive Exponential Integrate and Fire Neuron and Its FPGA-based verification

Kapsamlı bir basitleştirme yönteminin Uyarlanabilir Üstel Entegre ve Ateşlemeli Nöronuna uyarlanması ve FPGA tabanlı doğrulaması

Bekir Şıvga, *Nimet Korkmaz

990-1000

Research Article /*Araştırma Makalesi*

Machine learning-based temporal change detection of land use and land cover changes in the Tunçbilek open pit coal mine region using Planetscope imagery

Planetscope görüntüleri kullanılarak Tunçbilek açık ocak kömür madeni bölgesinde arazi kullanım ve örtü değişikliklerinin makine öğrenmesi tabanlı zamansal değişim tespiti

***Recep Uğur Acar, Enes Zengin, Ali Samet Öngen**

1001-1013

Research Article /*Araştırma Makalesi*

Velocity dynamics in Türkiye's nationwide cadastral network

Türkiye geneli kadastral ağlarda hız dinamiklerinin incelenmesi

Sena Özlem Yeniay, Halil İbrahim Solak, Cemil Gezgin, *İbrahim Tiryakioğlu

1014-1025

Araştırma Makalesi /*Research Article*

Arızlı (Afyon-Şuhut) ofiyolitik melanjında krizotil oluşumlarının mineralojik, petrografik ve jeokimyasal karakterizasyonu

Mineralogical, petrographical and geochemical characterization of chrysotile in the Arızlı ophiolitic mélange (Afyon-Şuhut, Türkiye)

***Cihan Yalçın, Mustafa Kaya**

1026-1034

Research Article /*Araştırma Makalesi*

Investigation of the potential of hull-less barley and hull-less oat to improve the nutritional and technological quality of bread

Kavuzsuz arpa ve kavuzsuz yulafın ekmeğin besinsel ve teknolojik kalitesini iyileştirme potansiyelin araştırılması

***Yaşar Karaduman, Gözde Yüksel Yıldırım, Arzu Akın**

1035-1048

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
ISSN: 2564-6605
Cilt/Volume: 14 Sayı/Issue: 3 2025
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Malzeme ve madde akış analizi ile illerin katı atık yönetiminin döngüselliğinin incelenmesi: Düzce ili örneği

Assessment of waste management circularity in provinces by using material and substance flow analysis: A case study of Düzce province

***Kadriye Elif Maçin**

1049-1058

Research Article /*Araştırma Makalesi*

Chemical characterization and adulteration risk evaluation of commercially available sour pomegranate concentrates from different regions

Farklı bölgelerden temin edilen ticari ekşi nar konsantrelerinin kimyasal karakterizasyonu ve tağşiş riskinin değerlendirilmesi

***Tuğba Gül Dikme, Sinem Güneş**

1059-1070

Araştırma Makalesi /*Research Article*

Ağır çıkma bulunan betonarme binalarda dış çerçeve düzensizliğinin deprem davranışına etkisinin incelenmesi

Investigation of the effect of external frame irregularity on seismic behavior in reinforced concrete buildings with heavy overhangs

Ömer Faruk Osmanlı, *Ömer Faruk Taş, Burak Çakıl, Ozan İnce, Erkut Sayın, Muhammet Karaton

1071-1081

Research Article /*Araştırma Makalesi*

Enhanced hydrogen storage via NaH and GO composites: Structural, morphological and spectroscopic insights

NaH ve GO kompozitleri ile geliştirilmiş hidrojen depolama: Yapısal, morfolojik ve spektroskopik incelemeler

***Ali Altuntepe**

1082-1087

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Fırında pişirilen patates kızartmalarında akrilamid oluşumunun optimize edilmiş gauss süreç regresyonu ile modellenmesi

Modeling acrylamide formation in oven-baked French fries using optimized gaussian process regression

***Eşref Boğar, Damla Nur Kaya, Deniz Kaynar, Büşra Braho, Melek Harmancı**

1088-1099

Research Article/*Araştırma Makalesi*

PushPull-YOLO: A biologically inspired framework for robust object detection under image corruptions

PushPull-YOLO: Görüntü bozulmaları altında güçlü nesne algılama için biyoloji esinli bir çerçeve

***Hasan Ali Akyürek**

1100-1115

Araştırma Makalesi /*Research Article*

Türkiye'nin araştırma ve geliştirme performansının ENTROPİ ve COPRAS yöntemi ile analizi: 2012-2023 yıllarının değerlendirmesi

Analysis of Türkiye's research and development performance using the ENTROPY and COPRAS methods: Evaluation of the years 2012-2023

***Ali Sevinç**

1116-1125

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
ISSN: 2564-6605
Cilt/Volume: 14 Sayı/Issue: 3 2025
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Araştırma Makalesi /*Research Article*

Sn-Ba-Cu-O seramiklerin manyetik kaldırma ve manyetik sertlik performansının ZnO katkılamasına bağlı gelişimi

Development of magnetic levitation and magnetic hardness performance of Sn-Ba-Cu-O ceramics due to ZnO doping

***Selva Büyükakkaş**

1126-1134

Araştırma Makalesi /*Research Article*

Sentetik vollastonit katkısının yüksek plastisiteli kil zeminlerin dayanım ve mikroyapı özelliklerine etkisi

Effect of synthetic wollastonite on the strength and microstructural properties of high-plasticity clay soils

Firdevs Uysal, *Esra Tatlıoğlu, Hasan Erhan Yücel

1135-1142

Araştırma Makalesi /*Research Article*

Geoteknik mühendisliği problemlerinin çözümünde iki boyutlu sonlu elemanlar çözümlemesi yazılımının kullanımı: ADONIS

Using of a two dimensional finite element analysis software for solving geotechnical engineering problems: ADONIS

***Betül Keseroğlu, Muhammet Dingil, Murat Örnek**

1143-1154

Review Article /*Derleme Makalesi*

A review on strategies for minimizing cogging torque in flux-switching permanent magnet machines

Akı anahtarlamalı sabit mıknatıslı makinelerde vuruntu momentini en aza indirme stratejileri üzerine bir inceleme

***Başak Tepretmez, Emrah Çetin**

1155-1170

Review Article /*Derleme Makalesi*

A review of collaborative strategies in last-mile logistics from an urban sustainability perspective

Kentsel sürdürülebilirlik perspektifinden son adım lojistikte iş birlikçi stratejilere yönelik bir inceleme

***Fatmanur Özer, Neslihan Demirel**

1171-1184

Düzeltme Makalesi /*Erratum Article*

Düzeltme Yazısı "Niğde ili'ndeki potansiyel evapotranspirasyon tahminlerinin trend analizi"
[NÖHÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6(2), 602-608, 2017]

Erratum to "Trend analysis of potential evapotranspiration predictions in Nigde province"
[NOHU Journal of Engineering Sciences 6(2), 602-608, 2017]

***Onur Arslan**

1185

Düzeltme Makalesi /*Erratum Article*

Düzeltme Yazısı "Akkaya Barajı'nın Niğde ili iklimine etkisi"
[NÖHÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6(2), 627-633, 2017]

Erratum to "Effect of Akkaya Dam on climate in Nigde province"
[NOHU Journal of Engineering Sciences 6(2), 627-633, 2017]

***Onur Arslan**

1186

Düzeltme Makalesi /*Erratum Article*

Düzeltme Yazısı "Kapadokya Bölgesi'nin yaz ayları buharlaşma verileri için trend analizi"
[NÖHÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(2), 948-953, 2019]

Erratum to "Trend analysis for evaporation data in summer months of Cappadocia Region"
[NOHU Journal of Engineering Sciences 8(2), 948-953, 2019]

***Onur Arslan**

1187

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 827-836

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

An investigation on installed performances of VHF and UHF turnstile antennas on 3U CubeSat platforms

3U küp uydu platformlarında VHF ve UHF turnike antenlerinin kurulu performansları üzerine bir inceleme

Orçun Kiriş[1, *]

[1] *ASELSAN Inc., Communication and Information Technologies Division, 06200, Ankara Türkiye*

Abstract

In this article, operational performance variations of VHF and UHF turnstile antennas widely utilized in Cube Satellites (CubeSats) are investigated according to their placement positions on 3U size platforms. Considering the utilizable space constraints in CubeSats and the volume of the orbital deployer case, a platform-integrated deployable turnstile antenna concept is applied for VHF and UHF antennas designed at 145 MHz and 435 MHz, respectively. The performances of conceptual deployable turnstile antenna designs are optimized by placing them separately in the central and edge regions of the 3U CubeSat platform. Then, their performances in the scenarios of joint use on the same platform are also investigated. The obtained results show that while the location of the antennas does not significantly affect the performances in individual placements, the performance of the UHF antenna is substantially increased in the central placement where VHF and UHF are installed on the same platform.

Keywords: CubeSat, Installed performance, Interaction analysis, Turnstile antenna, VHF antenna, UHF antenna

Öz

Bu makalede, küp uydularda yaygın olarak kullanılan VHF ve UHF turnike antenlerinin 3U boyutundaki platformlarına yerleşim konumlarına göre operasyonel performans değişimleri incelenmiştir. Küp uydulardaki kullanılabilir alan kısıtlamaları ve yörüngesel dağıtıcı kasasının hacmi göz önünde bulundurularak, sırasıyla 145 MHz ve 435 MHz'de tasarlanan VHF ve UHF antenler için platforma entegre konuşlandırılabilir turnike anten konsepti uygulanmıştır. Kavramsal dağıtılabilir turnike anten tasarımlarının performansları, 3U küp uydu platformunun merkez ve kenar bölgelerine ayrı ayrı yerleştirilerek optimize edilmiştir. Daha sonra, aynı platformda birlikte kullanım senaryosundaki performansları da incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, antenlerin yerleşiminin tek tek yerleşimlerde performansları önemli ölçüde etkilemediğini, ancak VHF ve UHF'nin aynı platforma yerleştirildiği merkezi yerleşimde UHF anteninin performansının önemli ölçüde arttığını göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Küp uydu, Kurulu performans, Etkileşim analizi, Turnike anten, VHF anten, UHF anten

1 Introduction

Space technologies have grown tremendously over the last three decades by enabling the development of numerous artificial satellites placed in orbit around the Earth or other planets for military, commercial or scientific purposes. These satellites can be categorized as Low Earth Orbit (LEO), Medium Earth Orbit (MEO), Geosynchronous Earth Orbit (GEO) and High Elliptical Orbit (HEO) according to their orbital altitude, and can also be classified as communication, observation, remote sensing and navigation satellites according to their application areas. National space agencies and private companies have had to make long-term and large investments in this field since the average build-up time of a conventional bulky satellites is approximately four years and its cost is around 50-100 million US dollars [1]. In addition to the cost of building these huge satellites, the launch costs for placing it into the desired orbit are also quite high considering their high weight (over 500 kg) and increase depending on the total mass of the satellite. These high budget requirements severely limit space exploration activities, especially for non-commercial scientific purposes.

In 1999, a scientific small satellite project was proposed jointly by academics from California Polytechnic State University and Stanford University that would allow frequent launches to increase access to space and ensure continuous development in satellite technologies [2]. The main aim of the project is to reduce launch costs by producing comparatively lighter and compact satellites that can be placed on launch platforms as secondary payload or carried into orbit by International Space Station (ISS) crew. The success of this project has paved the way for the design of low-profile, low-weight, low-cost small satellites, called CubeSats, composed of stripped-down subsystems and modularly compatible with standard launch vehicles. Essentially, the operational subsystems required for control, command and communication activities and the payloads added for mission-specific purposes constitute the two basic parts of the modest subsystem architecture of a CubeSat. Also, this simplified subsystem architecture allows designers to focus on the development of critical payloads and provides

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e- mail: orcunkiris@hotmail.com (O. Kiriş)
Geliş / Received: 17.03.2025 Kabul / Accepted: 08.04.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1659981

the opportunity to use commercial off-the-shelf (COTS) products with space heritage for operational subsystems.

Following their success in research and education, CubeSats have attracted industry attention due to their cost-effective yet promising features that provide an affordable trial-and-error opportunity to validate new space technologies. Since the risk of failure is unacceptable in the conventional high-cost satellites, each subsystem utilized must be backed up with a hot or cold redundant subsystem whose operational capability has been previously verified in the space environment against possible malfunctions. In hot redundancy, the subsystem and its space-heritage redundant are energized simultaneously and the function of subsystem on satellite is maintained as long as at least one of them remains operational. On the other hand, in a cold backup system, only one of the subsystems is operational at the same time and continues to operate until a failure occurs, at which time its space-heritage redundant backup system is switched on and takes over its operation. While both types of redundancy ensure operational continuity, they dramatically increase the satellite's system complexity, weight, and volume.

Providing the space qualification for each subsystem can be achieved in a short time with an expendable, low-cost CubeSat that contains only the subsystem desired to gain space heritage as the payload and COTS operational subsystem products with space heritage, instead of high-cost satellites. In this way, dozens of different mission-oriented CubeSats are carried into orbit on just a single launcher as companions of the launcher's main payload (usually a fairly heavy satellite or spacecraft) without any negative impact on operational process of the main payload. These advantages have made CubeSats one of the most popular proof-of-concept prototyping platforms for space applications over the last two decades.

This high demand for CubeSats due to easy accessibility has also led to the need to standardize their masses and dimensions, which vary depending on implementation types. CubeSats are dimensionally standardized by a cube shape called a "U" unit, with dimensions of 100 x 100 x 113.5 mm^3, and their size varies between 0.25U and 27U [3]. On the other hand, the mass classifications of small satellites are standardized according to their total weight such as mini (100-180 kg), micro (10-100 kg), nano (1-10 kg), pico (0.1-1 kg) and femto (0.01-0.1 kg) satellites. CubeSats are categorized as the nanosatellite since the maximum allowed standard weight per unit (U) is 1.33 kg [4]. Another purpose of these standardizations is to reduce the proper placement complexity of CubeSats on launchers during transportation. Before the orbital deployment process, CubeSats are stored in a standard-sized deployer compartment case designed to have a compatible interface with launchers. Thus, the launcher can be used at maximum capacity during its each voyage into space, since the number of CubeSats that the launcher can carry during the transportation can be clearly determined and planned. When the launcher arrived to desired orbit, the hatch of deployer compartment system is opened and the loaded spring at the bottom of the case ejects CubeSats into the orbit. On the other hand, the deployer case volume strictly limits the size of any component on a CubeSat. Therefore, the folded dimensions of potentially deployable components such as solar panels, antennas, etc. must be within the dimensions that can be stored inside the compartment during launch. This limitation makes deployable antenna systems indispensable for CubeSat systems, especially for large-sized telemetry and telecommand antennas operating at lower frequencies due to longer wavelengths.

Antennas are one of the most important components for CubeSat platforms that transmit and receive radio waves for different purposes such as communication, telemetry, telecommand, positioning, etc. However, most of the antenna systems used on conventional satellites are not suitable for CubeSats due to the profile limitations of the deployer systems. In general, either single-antenna or multiple-antenna configurations can be implemented for uplink and downlink operations depending on mission requirements and mechanical constraints. The operational frequencies of CubeSat antennas are usually chosen from the Industrial Scientific Medical (ISM) and amateur radio frequency bands that are not require any frequency allocation obligations or usage fees due to reduce operating costs [5]. The downlink frequency used to send telemetry data to the ground station is generally higher than the uplink frequency used to receive telecommand data from the ground station. Since the telemetry, tracking and control subsystems are the first subsystems to establish communication with ground stations after orbital deployment, the reliability of this connection and all subsequent satellite operations depend on the success of this phase [6]. Therefore, the UHF band around 435 MHz and the VHF band around 145 MHz have been very popular frequency bands since the development of CubeSats for downlink and uplink operations, respectively [3-11]. CubeSat designers commonly choose these bands for some practical reasons, such as low-loss propagation characteristics and the large variety of COTS components operating at these frequencies. However, antenna lengths are increasing considerably since free-space wavelengths in the VHF and UHF radio bands range from 300 mm to several meters. This situation making the deployable wire-based antenna structures an excellent choice for volume-constrained structures such as CubeSats [10]. Deployable wire-based antennas are stowed in a coiled state on the CubeSat chassis during launch, in accordance with the profile limitations of the deployer case. Once the orbital placement of CubeSat is complete, the stowed antenna is released to achieve operational form, typically using a heated resistor as a release mechanism.

One of the most widely used solutions for VHF and UHF antenna subsystems of CubeSats are quite simple, very flexible and ultra-low-cost whip antennas that can be implemented in monopole, dipole and turnstile feed configurations. It is even possible to use a piece of metallic tape measure as the radiator for a single-band VHF or UHF antennas with a monopole or dipole configuration. A V-shaped dipole antenna made of a piece of steel tape measure that is implemented with a coaxial balun structure for use in CubeSat missions is presented in [11]. The tape measure

peace is formed as V-shape in order to manipulate the radiation pattern of the designed VHF antenna to desired direction. Another tape-measure-based antenna in a deployable monopole antenna configuration in the UHF band is implemented on a CubeSat platform called PhoneSat that is built around an unmodified COTS smartphone by NASA [12]. In [13], CubeSat XI-IV developed by the University of Tokyo, successfully sent data obtained from its COTS camera to the ground station via a deployable UHF band linearly polarized dipole antenna. It is also possible to design dual-band antennas that can be operational in both VHF and UHF bands. In [14], the first and third harmonics of a monopole antenna are excited at 130 and 390 MHz, respectively. However, these antenna structures require additional RF circuits to separate the two bands in order to provide single-port dual-band performance.

The bottleneck of CubeSat communication, especially for high data rates, is the limited output power of satellites. Additional losses such as polarization loss, atmospheric loss, multipath interference, path loss, low antenna efficiency or gain, etc. require an extra link margin to maintain the operation in space applications. This can be accomplished by increasing antenna gains, which helps increase link margin, or by reducing losses that negatively impact the link budget. One of the most suitable solutions to reduce both atmospheric attenuation and polarization loss is to use circularly polarized antennas. While linearly polarized antennas are advantageous for communication links where the orientations of the transmit and receive antennas are well-aligned, the orientations of Cube-Sat antennas change continuously with respect to the ground station antenna due to its regular motion in orbit. These polarization-misalignment losses resulting from the operational conditions of space applications can be avoided by using circularly polarized antennas, which are inherently independent of orientation [15]. Circular polarization is also more suitable for trans-atmospheric communication since the rotating electric field according to direction of propagation making it more resistant to atmospheric attenuation caused by rain, fog, and ionospheric disturbances.

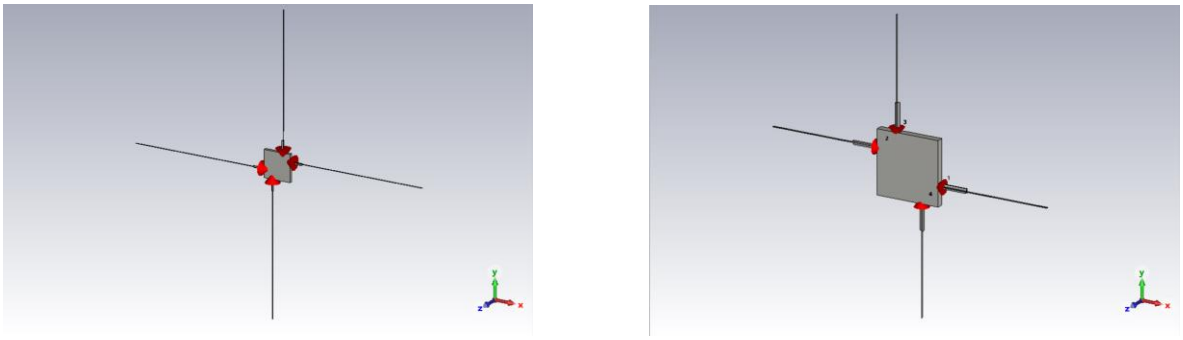
Benefiting from the advantage of circular polarization as well as the ability to be easily deployed, turnstile antennas have become a very popular solution option for reaching high data rates with their simple but effective antenna designs. Turnstile antennas consist of two dipole antennas placed perpendicular to each other and provide more directional circularly polarized radiation with higher gain compared to linearly polarized and omnidirectional monopole and dipole antennas. Circular polarization is achieved by creating a 90° phase difference between the dipoles at the operational frequency, either by adding a physical quarter wavelength path or by a 90° phase shifter between the feeds of the dipoles. [16-19]. It is also possible to obtain a turnstile antenna configuration by using four monopole antenna arms fed with a 90° phase difference placed on each side of a square [20-24]. Additionally, the monopole antenna arms can be optimized to provide high-gain radiation in the desired propagation direction, considering their positions relative to each other and the CubeSat platform [25]. On the other hand, the rapid increase in the variety of space-qualified deployable VHF and UHF commercial turnstile antenna products makes it more essential to optimize the installed performance of these COTS products on the platform used rather than optimization of the antenna design [26, 27]. Especially as the size of the CubeSat platform used increases, the placement options of COTS antenna products increase combinatorially. This situation forces CubeSat system designers to focus limited project time on the development of payload technology by minimizing operational risks in satellite communication with appropriate placement of COTS antennas on utilized platform. This situation directs CubeSat system designers to utilize functionally validated COTS antennas in space environment and to allocate limited project time to determining the most appropriate antenna and main payload placement positions on the platform in order to minimize operational risks in satellite communications.

In this study, the installed performances of deployable VHF and UHF turnstile antennas on 3U CubeSat platforms, which offer an optimum solution considering the cost and usable volumes for the on-board components, are investigated. Firstly, a circularly polarized deployable turnstile antenna concept is applied for VHF and UHF band antenna designs commonly used in realized CubeSats in literature. The 3U platform size, which is statistically the most preferred CubeSat size among CubeSats with 44.8%, is selected as the antenna placement platform on which the study to be conducted [5]. The performances of the designed conceptual VHF and UHF turnstile antennas are optimized by placing them separately in the central and edge regions of the determined CubeSat platform. The performance variations of these platform-specific optimized turnstile antennas are investigated for individual and tandem placement scenarios.

2 Material and method

2.1 Deployable VHF and UHF turnstile antenna design concepts

The space-qualified deployable COTS turnstile antenna products, especially in the VHF and UHF bands, have become very popular elements for CubeSat system designers as payload diversity increases and the need for high speed and high amount of data transmission for CubeSats becomes inevitable. In order to be compatible with all CubeSat applications of different U sizes, these COTS antenna products are generally designed by taking the unchanging aspect plane as reference (100mm x 100mm). Therefore, most of the deployable COTS antenna designs are built on a relatively thin square pedestal that can fit on the edge surfaces in the desired propagation direction axis of the 1U CubeSats or between any two U-cubes composing multi-U sized CubeSats. Accordingly, four deployable monopole antenna arms are placed perpendicular to each other on the four sides of the pedestal and excited with 90° phase difference successively. Depending on whether the excitation phase difference between the monopole arms is positive or negative in the clockwise direction, the turnstile



(a) (b)

Figure 1. The conceptual deployable turnstile antenna designs for (a) VHF band and (b) UHF band.

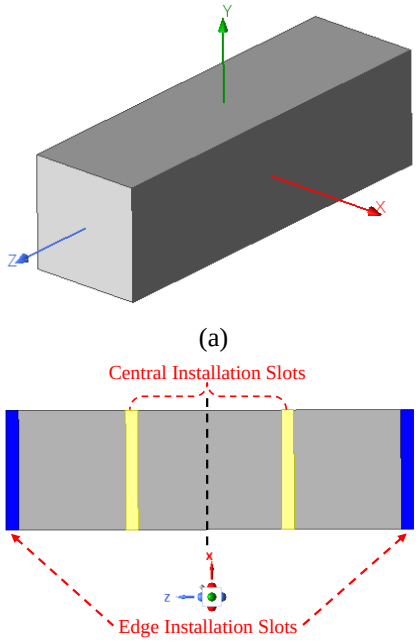
antenna performs right-hand circularly polarized (RHCP) or left-hand circularly polarized (LHCP) radiation patterns.

In order to be utilized in the platform installed performance analyses, which is the main objective of this study, two conceptual deployable antenna designs operating in VHF and UHF bands that mimic COTS CubeSat antennas are implemented by using CST Studio Suite as shown in Figure 1 (a) and Figure 1 (b), respectively. In the presented design concept, the z-axis is considered as the propagation direction and the pedestal is positioned in the x-y plane. The conceptual antenna designs are formed by placing a quarter wavelength (λ/4) monopole antenna arm on each of the four side-surfaces of the pedestal considering the lengths and maneuvering space of the deployment apparatus. Thus, the maximum dimensions of the designed deployable antennas do not exceed the size of the pedestal in the stowed state and can easily deployed when released by the mechanism apparatus. Ultimately, the proposed turnstile antenna designs are made as close as possible to COTS deployable CubeSat antennas considering their general characteristics and limitations.

Since the wavelength in the VHF band is larger than that in the UHF band, the length values of the monopole arms are expected to be longer for the VHF band turnstile antennas unless a special design technique is applied. Also, the monopole arm lengths should be optimized according to the utilized platform in both frequency bands to obtain efficient radiation patterns. On the other hand, the monopole arm length on each surface can be optimized individually in order to improve the axial ratio (AR) of circular polarization. However, the monopole arm lengths are kept equal in order to preserve the simplicity of the conceptual antenna designs in all analyses in this platform installment effect-based performance investigation study. Moreover, in order to make the scenario of jointly use on the same CubeSat platform more realistic, the monopole arms of the VHF and UHF antenna designs are excited to provide their most commonly used polarizations in literature, RHCP and LCHP, respectively. In this way, the possibility of the radiation patterns of the antennas affecting each other and compromising data transmission is aimed to be reduced. Thus, the performances of both antenna designs are individually optimized according to the placement locations on the utilized 3U CubeSat platform and the performance changes of the optimized sized antenna designs in tandem installation (co-use) scenarios are clearly examined.

2.2 3U CubeSat platform

The 3U platform size is selected for the antenna installation platform, as the most cost-effective CubeSat size with dimensions of 100 x 100 x 340.5 mm^3. Although it is known in the literature that dielectric materials on the platform surface may affect the antenna performance according to operating frequency in real applications, this effect is negligible for relatively low frequencies VHF and UHF [28-30]. Therefore, the platform structure is simplified and assumed as a perfect electrical conductor (PEC) as shown in Figure 2 (a). Since the platform structure is mirror image symmetric with respect to the black-dashed line as seen in Figure 2 (b), it can be said that there are only two different possible placement slot positions (blue and yellow) for each antenna design.



(a)

(b)

Figure 2. Simplified model of 3U CubeSat: (a) perspective-view and (b) side-view.

3 Results and discussion

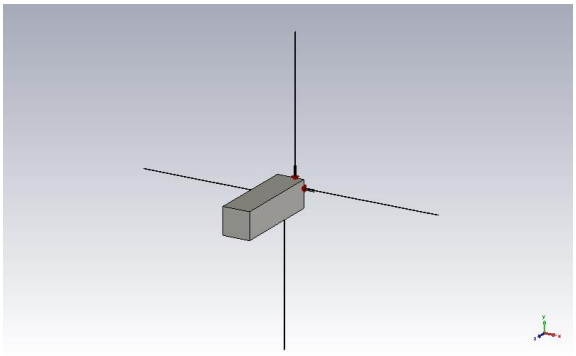
The free-space radiation performances of monopole antennas, which are also utilized in this study, vary depending on the size of the installation platform. On fixed-size platforms, such as 3U CubeSat, optimizing the performance of antenna designs according to their position on the platform is still an efficient method, since the antennas are ultimately intended to operate on these platforms.

3.1 Individual installations

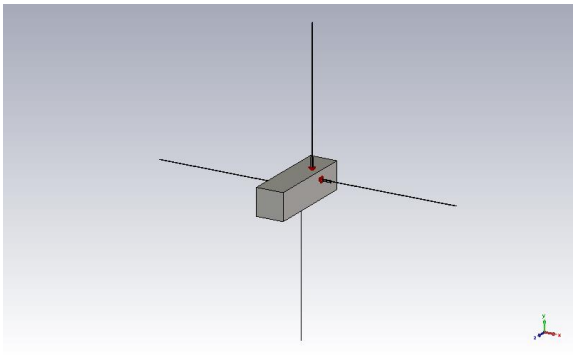
Firstly, the performances of the designed conceptual VHF and UHF turnstile antennas are optimized individually according to their installation positions on the platform.

3.1.1 Installed performance optimizations of the VHF antenna design

The conceptual turnstile VHF antenna design is individually placed in the side and central slots and its four identical monopole antenna arm lengths (L_{arm}) are optimized for both different installation case as given in Figure 3 (a) and (b). It is observed that the optimized L_{arm} value is 490 mm at 145 MHz operating frequency to obtain maximum RHCP gain in both placement scenarios. As can be seen from Figure 4 (a)-(d), for a turnstile antenna design in the VHF band, the installation position variations on a 3U CubeSat platform do not cause any significant change in terms of S_{11}, AR and RHCP gain patterns. Even so, it can be said that the results of the central slot placement are slightly better and relatively preferable to the edge slot placement.

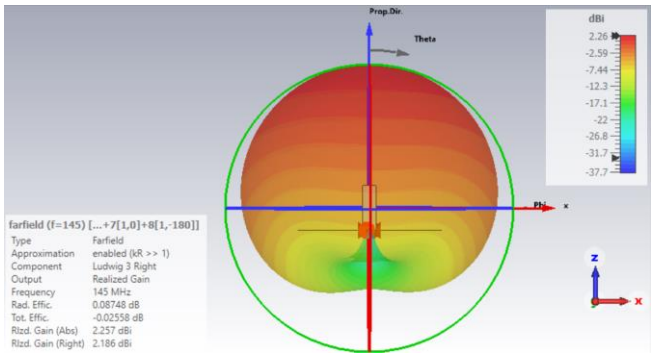


(a)

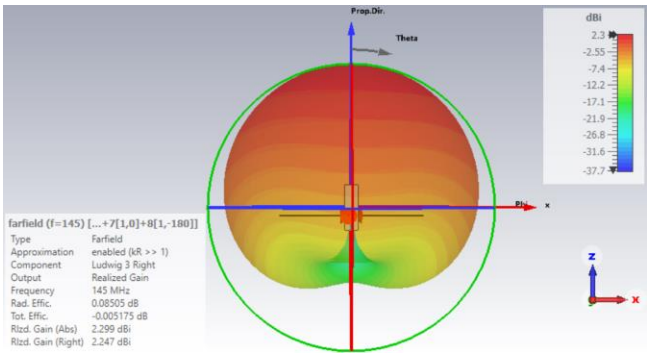


(b)

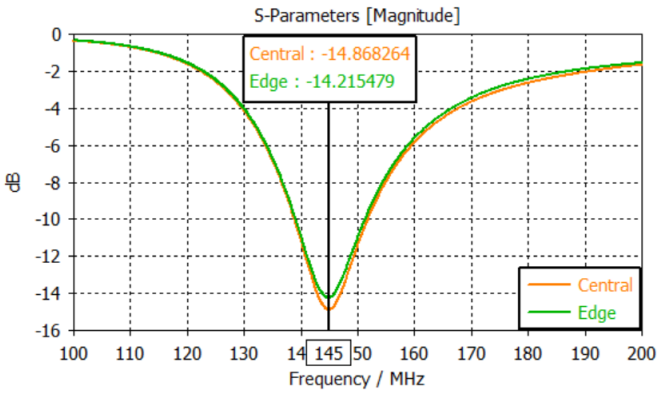
Figure 3. Individual installation scenarios for VHF antenna design: (a) edge slots and (b) central slots.



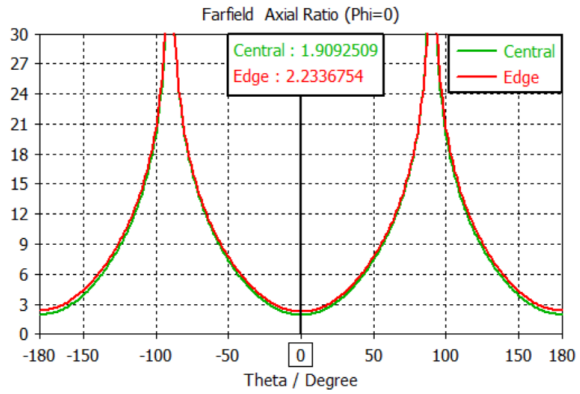
(a)



(b)



(c)

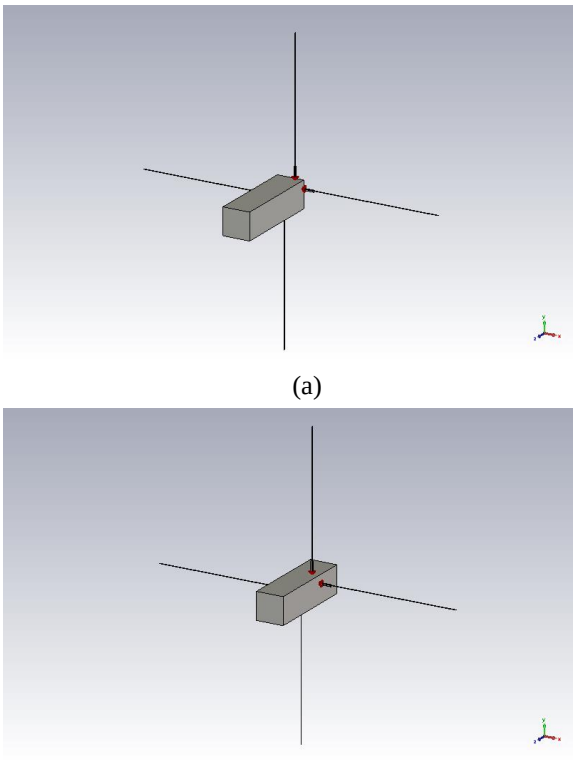


(d)

Figure 4. The optimized VHF antenna: RHCP gain performances for the placement of (a) edge slots, (b) central slots, and performance comparison of (c) S_{11} and (d) axial ratio.

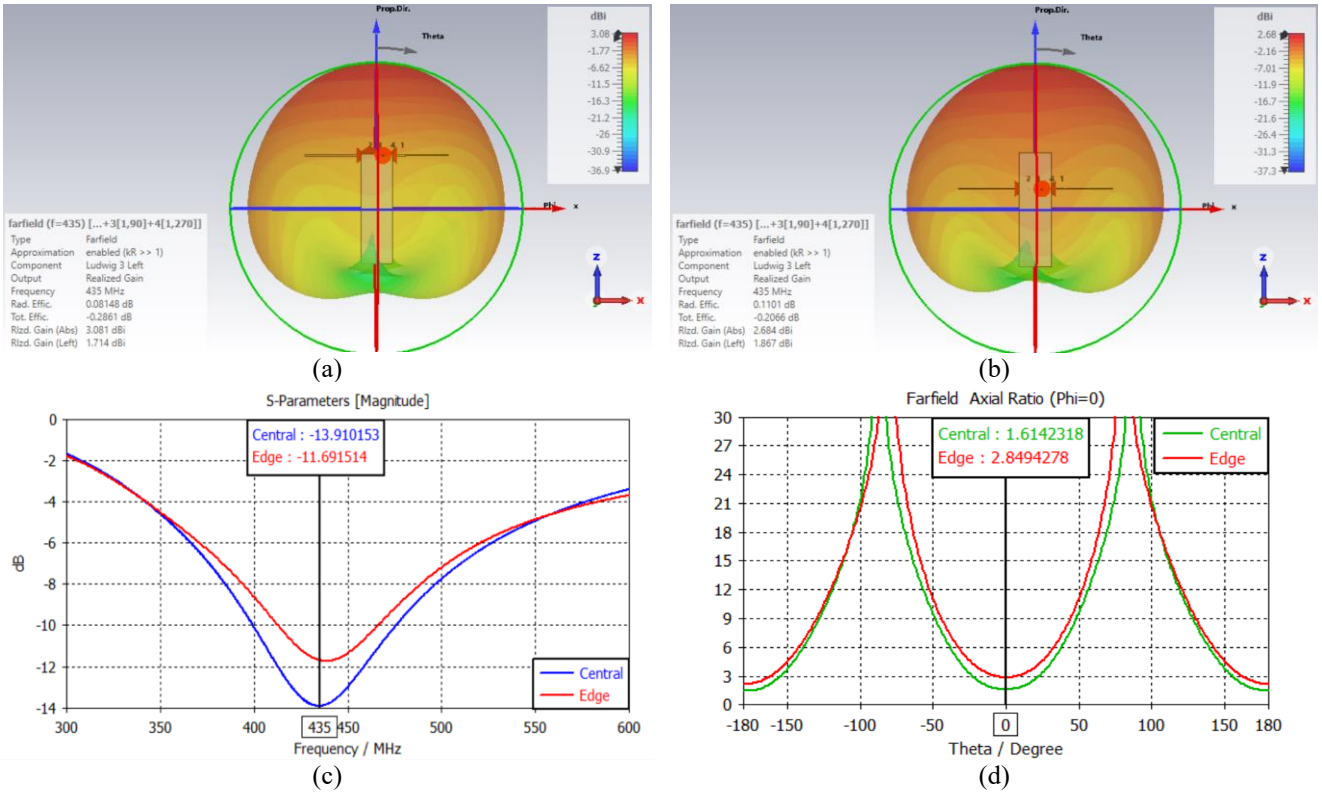
3.1.2 *Installed performance optimizations of the UHF antenna design*

The individual placement performance optimizations of the conceptual turnstile UHF antenna design are realized for the side and central slots as shown in Figure 5 (a) and (b). Considering that the UHF frequency band is relatively higher and the wavelength is smaller, the fixed dimension 3U platform size is also larger then compare to VHF band in terms of electrical length. Therefore, the installation position has more impact on the antenna performance, and maximum LHCP gains are achieved with two different L_{arm} values, 174 mm and 182 mm, at 435 MHz operating frequency for edge and central installation options, respectively. The high similarity in the LHCP gain radiation pattern results of both placement options presented in Figure 6 (a) and (b) indicates that the optimization quality of the antenna designs is sufficiently high. On the other hand, when the results in Figure 6 (c) and (d) are examined, it is observed that the central slot placement provides better performance results not only for S_{11} and but also in terms of AR. Since even small improvements in these terms are of vital importance for the applications requiring long-distance communication with limited power, such as CubeSats, the central slot placement can be recommended for UHF turnstile antennas. Thus, the communication link budget can be used more efficiently by reducing the return loss and polarization loss factors increasing proportionally with the S_{11} and AR values, respectively.



(a) (b)

Figure 5. Individual installation scenarios for UHF antenna design: (a) edge slots and (b) central slots.



(a) (b) (c) (d)

Figure 6. The optimized UHF antenna: LHCP gain performances for the placement of (a) edge slots, (b) central slots, and performance comparison of (c) S_{11} and (d) axial ratio.

3.2 Tandem installations

The effects of placement positions on the antenna performances are also analyzed in the case of installing these optimized VHF and UHF turnstile antennas together on the same platform, called tandem installation.

3.2.1 Installed performance analyses of placement in edge slots

The antenna designs optimized specifically for the edge slots are simultaneously applied on the edge placement slots of the same 3U CubeSat platform, as shown in Figure 7, in order to analyze the effect of the antenna positions relative to each other and the platform on the co-operational performance of the antennas. In the previous sections of the study, the optimized L_{arm} values for the individual edge slot installations of the antenna designs operational at 145 MHz and 435 MHz are determined as 490 mm and 174 mm, respectively. Furthermore, these dimensions are also kept the same in the case of tandem installation of the antennas on edge placement slots of the same platform. The circularly polarized (CP) gain radiation pattern results obtained from the simulation of tandem placement of VHF and UHF turnstile antenna designs on the edge slots are shown in Figure 8 (a) and (b), respectively. When the results are examined, it can be said that using both antennas together in the edge slots of the platform adversely affects the performance of the CP gain patterns comparing their individual installation performance. AR results of the same antennas are also given in Figure 8 (c) and (d).

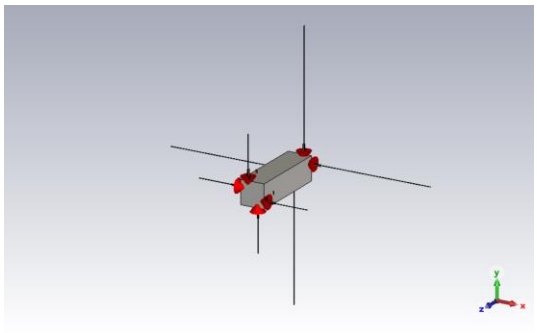


Figure 7. Tandem installation of the optimized VHF and UHF antenna designs in edge slots.

According to these results, the AR of the VHF antenna is improved in the tandem installation compared to its counterpart results for individual placement. On the other hand, the AR performance of the UHF antenna in tandem installation is dramatically deteriorated compared to the individual installation performance. In light of all these results, it can be said that tandem installation on edge slots is not efficient enough for 3U CubeSat platforms. Nevertheless, the decrease in antenna CP gains and the increase in polarization losses resulting from adversely affected axial ratios must be considered in the communication link budgets for uplink and downlink operations separately, in case edge slot placement is utilized in tandem installation by CubeSat system designers due to project constraints, accessibility etc.

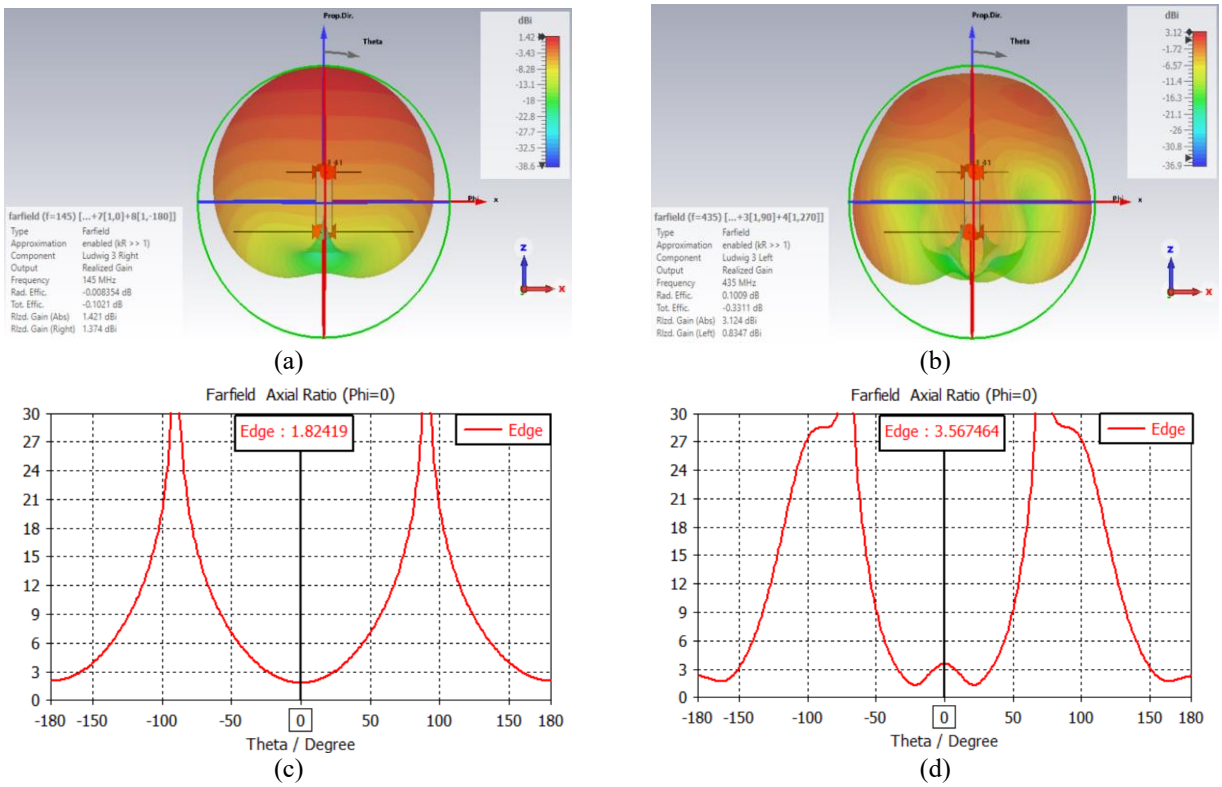


Figure 8. The edge placement performance results for antenna CP gains of a) VHF, and b) UHF, and axial ratio results for c) VHF, and d) UHF antennas.

3.2.2 *Installed performance analyses of placement in central slots*

To examine the effect of the central slot installations on the joint use performance of both antennas, the optimized VHF and UHF antenna designs specifically for central slot placements are implemented simultaneously to the same platform as seen in Figure 9. The dimensions of these antenna designs, optimized for operating frequencies of 145 MHz and 435 MHz and with Larm values determined as 490 mm and 182 mm, respectively, are also kept the same in this tandem installation performance analysis based on central slot placement. The CP gain pattern results obtained from the simulation of tandem placement in the central slots of VHF and UHF turnstile antenna designs are shown in Figure 10 (a) and (b), respectively. According to the results, it can be said that using both antennas together in the central slots of the platform negatively affects the CP gain performance of the VHF antenna design compared to the individual installation performances, but still provides better results compared to the tandem installation results in the edge slots. On the other hand, while the CP gain performance of the UHF antenna design is 1.973 dBi for individual placement for boresight direction (θ=0° & φ=0°) and 0.8347 dBi for tandem installation for edge slots, it is surprisingly improved to 4.926 dBi when both antennas are used together in the central slots of the 3U CubeSat platform. Similarly, the AR results for both antennas are significantly improved with tandem installation in the central slots, as can be seen in Figure 11 (a) and (b). The simulation results obtained for all placement scenarios are given comparatively in Table 1 in terms of S_{11}, CP gain and AR.

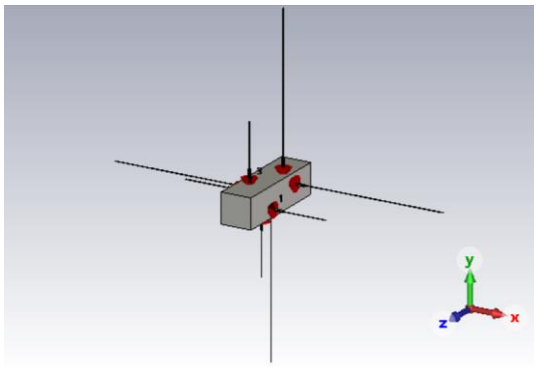


Figure 9. Tandem installation of the optimized VHF and UHF antenna designs in central slots.

In light of these results, it is observed that VHF turnstile antennas are less affected by the platform and more effective in individual central slot placement in terms of CP gain. On the other hand, it has been obtained from the results that UHF turnstile antennas are more effective in central slot placement in both individual and tandem installation conditions, but provide a significant CP gain advantage in central slot tandem installation. Moreover, tandem installation in central slots is the most prominent installation type in all the layout scenarios examined with its relatively lower AR, lower S_{11} and higher CP gain.

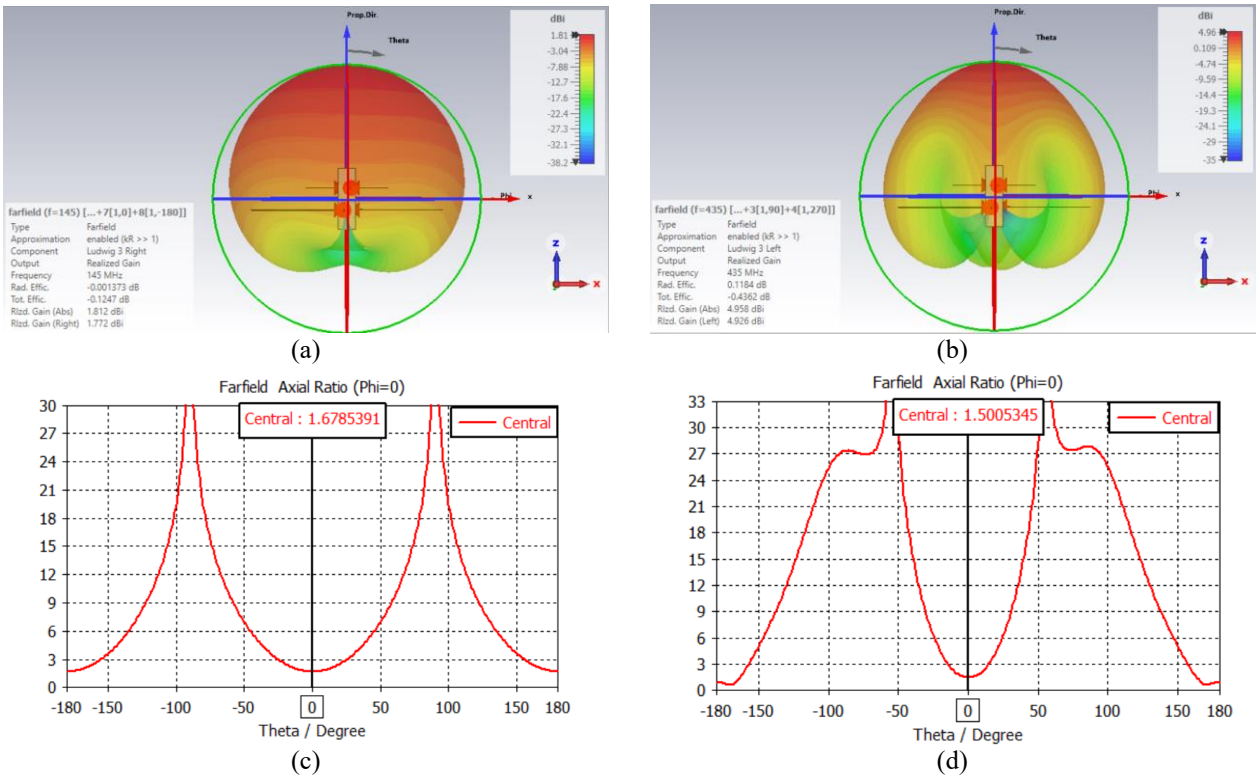


Figure 10. The central placement performance results for antenna gains of a) VHF, and b) UHF, and axial ratio results for c) VHF, and d) UHF antennas.

Tablo 1. Comparison of the obtained simulation results for all placement scenarios

		S_{11} (dB)		Axial Ratio (dB) (θ=0° & φ=0°)		CP Gain (dBi) (θ=0° & φ=0°)	
		VHF (145 MHz)	UHF (435 MHz)	VHF (145 MHz)	UHF (435 MHz)	VHF (145 MHz)	UHF (435 MHz)
Individual Installation	Edge Slot	-14.21	-11.69	2.23	2.85	2.186	1.714
	Central Slot	-14.86	-13.91	1.90	1.61	2.247	1.867
Tandem Installation	Edge Slots	-25.12	-12.33	1.82	3.56	1.374	0.8347
	Central Slots	-17.89	**-15.26**	**1.67**	**1.50**	1.772	**4.926**

4 Conclusions

In this study, the performances of VHF and UHF turnstile antennas, which are very popular in CubeSats and have a wide range of COTS products, are comparatively investigated in terms of S_{11}, AR and CP gain parameters according to their placement positions on 3U platforms. Considering the volumetric constraints in CubeSat applications, a platform-integrated deployable turnstile antenna concept is implemented and CP gain performances under ideal feeding conditions are optimized with respect to individual installation position on platform for VHF and UHF antennas designed at 145 MHz and 435 MHz, respectively. Furthermore, the effects of a nadir pointing 3U CubeSat platform on the performance results in individual and joint use scenarios for the central and edge slots placements are examined. According to the results obtained, although the position of the antennas does not significantly affect the performances in individual placements, the central slot placement is still more preferable for both VHF and UHF antennas. However, it is observed that there is a significant increase in the CP gain performance of the UHF antenna, along with the improvement in S_{11} and AR values in case of the central slot placement in tandem installation scenario of VHF and UHF antennas. It is understood that in case of tandem installation in central slots, physically larger VHF antenna contributes to CP gain performance of UHF antenna whereas relatively smaller UHF antenna causes congestion and CP performance of VHF antenna decreases compared to single installation scenario. The learnings from this investigation have critical importance to increase the communication link budget efficiency, especially for the satellite system designers developing CubeSat applications while utilizing COTS products. This study also aims to facilitate the antenna placement issue for CubeSat system designers even if they do not have sufficient antenna expertise. In light of this study, future studies can also be conducted using the exact dimensions and feeding network performances of COTS deployable turnstile antenna products implemented on various CubeSat platforms sizes.

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): %12

References

[1] R. Sandau, Status and trends of small satellite missions for earth observation. Acta Astronautica, 66, 1–12, 2010. https://doi.org/ 10.1016/j.actaastro.2009.06.008 .

[2] S. Clark, A chat with Bob Twiggs, father of the CubeSat. https://spaceflightnow.com/news/n1403/08cubesats/index2.html, Accessed 14 March 2025.

[3] CalPoly USA, CubeSat design specification. http://www. cubesat.org/cubesatinfo/, Accessed 14 March 2025.

[4] N. Chahat, CubeSat Antenna Design. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2020.

[5] E. Kulu, Nanosats Database. https://www.nanosats.eu/database, Accessed 14 March 2025.

[6] S. Gao, Antennas for Modern Small Satellites. IEEE Antennas Propag. Mag., 51, 4, 2009. https://doi.org/10.1109/MAP.2009.5338683.

[7] ISIS Space, VHF Uplink/UHF downlink full duplex transceiver. https://www.isispace.nl/product/isis-uhf-downlink-vhf-uplink-full-duplex-transceiver/, Accessed 14 March 2025.

[8] B. Dinç, TAMSAT CubeSat VHF/UHF transponder v1.0. http://www.tamsat.org.tr/tr/ tamsat-cubesat-vhf-uhf-transponder-v1-0/, Accessed 14 March 2025.

[9] Clyde Space, CPUT VUTRX transceiver. https://www.aac-clyde.space/what-we-do/space-products-components/communications/pulsar-vutrx, Accessed 14 March 2025.

[10] C. Kakoyiannis and P. Constantinou, Electrically Small Microstrip Antennas Targeting Miniaturized Satellites: the CubeSat Paradigm, Microstrip Antennas, InTech, Vienna, pp. 273–316, 2011.

[11] T. Dolapçı, Design, simulation, and fabrication of cubesat antenna systems. Master Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Türkiye, 2020.

[12] A. Guillen et al., PhoneSat in-flight experience results. Small Satellites Systems and Services Symposium, pp.1-19, Majorca, Spain, 2014.

[13] Y. Tsuda et al., University of Tokyo's CubeSat project - it's educaitonal and technological significance. 15th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, pp.1-8, Utah, USA, 2001.

[14] E. S. Moghaddam, N. Aboutorablad, S. Amiri, S. Nikmehr, and P. Rezaei, design and analysis of a dualband antenna for small leo satellite applications. 3rd International Conference on Computational Electromagnetics and Its Applications, pp. 228–231, Beijing, China,2004.

[15] K. Keyghobad, J. M. Baabuei, and T. Heydari, Design & fabrication of turnstile antenna with feed network optimization for LEO satellites. 6th International

Conference on Antenna Theory and Techniques, pp. 286, Sevastopol, Ukraine, 2007.
[16] E. S. Moghaddam and S. Amiri, Development of separated turnstile antenna for space applications. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 50, 84–93, 2008. https://doi.org/ 10.1109/MAP.2008.4653665.
[17] S. X. Ta, I. Park, and R. W. Ziolkowski, Crossed dipole antennas: a review. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 57, 5, 107–122, 2015. https://doi.org/ 10.1109/MAP.2015.2470680.
[18] S. D. Kulkarni and S. N. Makarov, A circularly polarized UHF antenna at 550- 700 MHz. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, pp. 2981–2984, Honolulu, USA, 2007.
[19] I. Radnovi´c, A. Neši´c, and B. Milovanovi´c, A new type of turnstile antenna. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 52, 5, 168–171, 2010. https://doi.org/ 10.1109/MAP.2010.5687522.
[20] O. Kiris, K. Topalli and L. Kuzu, A wideband circularly polarized GNSS antenna for satellite platforms. 2019 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES), pp. 1-2 Miami, FL, USA, 2019.
[21] O. Kiris, A vibration resistant GNSS antenna with reduced size and weight for wideband satellite applications. 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, pp. 1841-1842, Montreal, QC, Canada, 2020.
[22] O. Kiris, A vibration-proof wideband GNSS antenna for space applications. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 39, 2, 34-38, 2024. https://doi.org/ 10.1109/MAES.2023.3340649.
[23] O. Kiris, A compact all-band spacecraft antenna with stable gain for multi-band GNSS applications. Applied Science, 14, 19, 8761, 2024. https://doi.org/10.3390/app14198761.
[24] O. Kiriş, Wideband circularly polarized antenna for multiband GNSS receiver on IMECE. 10th International Conference on Recent Advances in Air and Space Technologies (RAST), pp. 1-4, Istanbul, Türkiye, 2023.
[25] E. Karapinar, Modification and verification of an antenna design for petite amateur navy satellite (PANSAT) using NEC. Master's thesis, Naval Postgraduate School, California, USA, 1995.
[26] ISIS Space, CubeSat Antenna System for 1U/3U. https://www.isispace.nl/product/cubesat-antenna-system-1u-3u/, Accessed 14 March 2025.
[27] GOMSpace, NanoCom ANT430. https://gomspace.com/shop/subsystems/communication-systems/nanocom-ant430.aspx, Accessed 14 March 2025.
[28] O. Kiris, F. Ozturk and M. Gokten, A dielectric measurement-based design approach for x-band applications on FR4 substrate. 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, pp. 783-784, Montreal, QC, Canada, 2020.
[29] O. Kiris, F. Ozturk, Dielectric characterization using waveguide method for antenna and radome materials in space applications. Microwave and Optical Technology Letters, 66, e34246 https://doi.org/10.1002/mop.34246.
[30] O. Kiris, X-Bant uydu uygulamaları için dielektrik ölçüm yaklaşımı tabanlı kompakt U-yarıklı yama anten tasarımı. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12 (1), 119-125, 2023. https://doi.org/ 10.28948/ngumuh.1194496.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 837-845

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

3B yazıcılarda üretilmiş farklı renkli PLA malzemelerin mekanik ve optik özelliklerinin incelenmesi

Investigation of the mechanical and optical properties of different colored PLA materials produced by 3D printers

Mustafa Samet Özkara[1], Furkan Güneş[2], Erhan Baysal[3], Furkan Parmaksız[4], Nergizhan Anaç[5,*], Oğuz Koçar[6]

[1,2,4,5,6] *Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 67100, Zonguldak, Türkiye*
[3] *Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Alaplı Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 67850, Zonguldak, Türkiye*

Öz

3B yazdırma işlemi, popüler eklemeli imalat yöntemlerinden biridir. 3B yazıcılarda kullanılan filament malzemeleri ve eklenen katkı maddeleri (renklendiriciler, plastikleştiriciler, dolgu malzemeleri vs.) üretim sürecini, ürünün görsel, mekanik ve optik özelliklerini etkileyen unsurlardır. Bu çalışma 3B yazıcıda üretim yapan araştırmacıların ürünlerde mukavemet, renk ve yüzey yapıları (parlak, mat) arasındaki ilişkiyi anlaması için yapılmıştır. Sekiz farklı renk PLA Plus filament (beyaz, turuncu, pembe, açık mavi, kırmızı, altın sarı, siyah ve kahverengi) ile %100 doluluk oranında parçalar basılmış ve yüzey pürüzlülüğü, mekanik (çekme, eğme ve sertlik) ve optik özellikler (renk ve parlaklık) incelenmiştir. Deneylerde, en iyi çekme ve eğme mukavemeti beyaz filamentte sırasıyla 59.06 MPa ve 108.75 N olarak bulunmuştur. Bu renk malzemede en yüksek sertlik değeri (86.28 Shore D), en düşük yüzey pürüzlülüğü (2.95 µm) ve en parlak yüzey ölçülmüştür. Sonuçlar filament renklerinin mekanik özelliklerde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve 3B yazıcı kullanıcılarının üretimde renkleri dikkate alması gerektiğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: 3B baskı, PLA plus, Mekanik özellikler, Yüzey pürüzlülüğü, Optik özellikler

Abstract

3D printing is one of the popular additive manufacturing methods. Filament materials and added additives (colorants, plasticizers, fillers, etc.) used in 3D printers affect the production process as well as the visual, mechanical, and optical properties of the product. This study was conducted to help researchers using 3D printers understand the relationship between strength, color, and surface structures (glossy, matte) in printed products. Parts were printed using eight different colors of PLA Plus filament (white, orange, pink, light blue, red, golden yellow, black and brown) with 100% infill. Surface roughness, mechanical properties (tensile, flexural, and hardness), and optical properties (color and gloss) were analyzed. The highest tensile and flexural strength values were found in white filament (59.06 MPa and 108.75 N, respectively). This color also had the highest hardness (86.28 Shore D), the lowest surface roughness (2.95 µm), and the glossiest surface. The results indicate that filament colors significantly affect mechanical properties, and 3D printer users should consider color selection in production.

Keywords: 3D printing, PLA plus, Mechanical properties, Surface roughness, Optical properties

1 Giriş

3 boyutlu yazıcı ile imalat tekniği, yenilikçi eklemeli imalat yöntemlerinden biridir. Hem ev kullanıcılarına hem de sanayide üreticilere hitap eden çalışma prensibi sayesinde oldukça popüler olmuştur. 3B baskı almak için tasarlanan parça, sarf malzemesi olarak kullanılan filamentin belli bir sıcaklıkta erimesi ve katman katman üst üste eklenmesiyle üretilmektedir. Filamentler biyobozunur veya petrol türevli kaynaklardan elde edilmektedirler. Filamentin granül formundan plastik tel haline gelme süreci 3B yazıcıda basım esnasındaki akışı ve imalat kalitesini etkiler [1]. Bu süreçte filament malzemelerine eklenen çeşitli katkılar (renklendiriciler, dolgu maddeleri, plastikleştiriciler ve diğer katkı maddeleri) malzemelerin özelliklerini değiştirmektedirler [2]. Üretimde kullanılan malzemelerin özelliklerini bilmek süreci doğru yönetmek için gereklidir. Bununla beraber 3B yazıcı filamentleri söz konusu olduğunda her zaman bu mümkün olamamaktadır. Bu nedenle araştırmacılar, 3B yazıcılar, yazdırma parametreleri, filament malzemeleri ve son ürün özelliklerini geliştiren ardıl işlemlere kadar 3B yazdırma işlemini farklı bölümlerde incelemektedirler. 3B yazdırma işleminde filament tipi, katman kalınlığı, doluluk oranları, yazdırma yönü gibi baskı parametrelerinin yanı sıra parça baskı kalitesini belirleyen yüzey pürüzlülüğü ve çekme mukavemeti gibi göstergeler bulunmaktadır [3].

3B yazdırma çalışmaları ilerledikçe, yeni araştırma konuları ortaya çıkmıştır. Bunlardan biri, parçaların optik özelliklerinin ve mukavemetle ilişkisidir. Plastiklerin kullanıldığı birçok sektörde ürün estetiği ve yüzey özellikleri önemlidir. Plastikler çok çeşitli renklere sahip olabilirler. Yapılan literatür araştırmasında 3B basılmış renkli 3B

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: nergizhan.kavak@beun.edu.tr (N. Anaç)
Geliş / Received: 20.02.2025 Kabul / Accepted: 11.04.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1643581

malzemelerin optik özelliklerini anlamak için gerçekleştirilmiş bazı çalışmalar [4] olduğu görülmüştür. Soares vd. üç farklı renkte (natürel, siyah ve gri) model üreterek ürün kalitesinin filament rengi ile ilişkisi hakkında yaptıkları çalışmada bozunma ve cam geçiş sıcaklığının PLA rengi ile değiştiğini raporladılar [5]. Farklı renkler (gri, yeşil ve pembe) ile renk pigmenti içermeyen şeffaf PLA kullanılan bir başka çalışmada araştırmacılar en düşük yüzey pürüzlülüğünü şeffaf PLA'da belirlediler ve bunun nedenini viskozitenin değişmesi olarak açıkladılar. Yeşil rengin PLA için en kötü mekanik özelliği verdiğini ve pigmentin, polimerin özelliklerini ciddi şekilde değiştirdiğini ifade ettiler [6]. Beyaz, siyah ve gri filament renklerinde üretilen diğer bir çalışmada PLA rengine bağlı aşınma ile sürtünme davranışlarının değiştiği ve beyaz rengin en yüksek sürtünme katsayısını sunduğu rapor edilmektedir [7]. Renk etkisinin incelendiği bir başka çalışmada ise farklı doluluk oranlarına (%15, %30 ve %50) ve renk dağılım oranlarına (%33, %66 ve %99) sahip mavi, yeşil ve kırmızı PLA numuneleri araştırıldı. Çekme dayanımı üzerinde renk pigmentinin %12.85 ve renklendirmenin %2.46 etkili olduğu ifade edildi.

Ayrıca PLA Plus için %50 doluluk oranında en az yüzey pürüzlülüğü mavi renkte tespit edilmiştir [8]. Farklı parametrelere (baskı hızı, katman kalınlığı ve baskı sıcaklığı) bağlı olarak kırmızı, mavi ve sarı renk PLA filamentlerinin kullanıldığı bir başka çalışmada tüm renkler için baskı parametrelerine göre çekme mukavemeti değerleri farklılık göstermektedir [9]. Frunzaverde vd. yaptıkları çalışmada farklı katman kalınlıklarında (0.05, 0.10, 0.15 ve 0.20 mm) siyah, kırmızı, gri ve natürel renkli filamentler kullandı. Tüm katman kalınlıklarında en iyi çekme mukavemeti (57.10-59.82 MPa) gri renkte görülürken en kötü dayanıma sahip renk siyah olarak belirlenmiştir [10]. Renk etkisini belirlemek isteyen bir diğer çalışmada ise 14 farklı renkte PLA üreten araştırmacılar en iyi çekme mukavemeti sunan renklerin sırasıyla kırmızı, siyah ve gri olduğunu ifade ederken renklere bağlı olarak çekme mukavemetinin 35-46 MPa arasında değiştiğini raporladılar [11]. Boyaların ve pigmentlerin üretim sürecine dahil edilmesi polimerlerin performansını etkilemektedir. Malzemenin ömrünü azaltabilir veya bozulmaya karşı stabilitesini iyileştirebilir. Bu sebeple üretilen polimerlerde renk pigment etkisinin dikkate alınması önemlidir.

Aydın vd. [12] PLA (polilaktik asit) filamentin 190°C, 200°C, 210°C ve 220°C sıcaklıklarındaki reolojik özellikleri ve 30, 50 ve 70 mm/saniye gibi üç farklı yazdırma hızında shore-D sertlik ve çekme testleri ile mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Bununla birlikte, yazdırma sıcaklığının malzemenin renginde sıcaklığa bağlı değişimi değerlendirilmiş ve yaptıkları renk analizlerine göre hem yazdırma hızının hem de sıcaklığın etkisinin az olduğunu ifade etmişlerdir.

Literatür incelendiğinde filament rengi, çekme, eğme mukavemeti, yüzey pürüzlülüğü ve akış hızı arasındaki ilişkinin incelendiği çalışmaların olduğu belirlenmiştir. Filament rengi özellikle son kullanıcıyı doğrudan ilgilendirdiği için renk her geçen gün artmaktadır. Yapılan çalışmada, %100 doluluk oranlarında farklı renklerdeki PLA Plus malzemelerin yüzey pürüzlülüğü, mekanik (çekme, eğme, sertlik) ve optik özellikleri (renk ve parlaklık) incelenmiştir. Özellikle filament renginin mekanik ve optik özelliklere etkisini bir arada inceleyen bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Filament renginin (beyaz, turuncu, pembe, açık mavi, kırmızı, altın sarı, siyah, kahverengi) malzeme özellikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Üretilen numunelerin sertlikleri, yüzey pürüzlülükleri, renk ve parlaklıkları ölçülmüştür. Numunelere çekme ve eğme testleri yapılarak mukavemetleri değerlendirilmiştir.

2 Materyal ve metot

2.1 Filament özellikleri

Deneylerde Esun markasına ait PLA Plus filamentler kullanılmıştır. PLA doğası gereği, insan sağlığına zarar vermeyen, yüksek biyo içeriğe sahip, toksik olmayan ve karbon ayak izini azaltan bir yapıya sahip olmakla beraber yapısında bulundurduğu şeker kamışı ve mısır nişastası gibi organik kaynaklar ile çevre dostu uygulamalar için de kullanılabilmektedir. Bu yöntemde en fazla tercih edilen baskı malzemelerinden biri PLA'dır. PLA ve PLA esaslı malzemeden imal edilen ürünler çok çeşitli ürünlerde günlük yaşamda kullanılmaktadır. PLA Plus, PLA malzemesinin güçlendirilmiş halidir ve PLA'ya göre daha yüksek darbe direnci ile daha yüksek tokluk özellikleri göstermektedir [13]. Bu nedenle çalışmada kullanılan deney numunelerinde PLA Plus seçilmiştir. Üretilen baskı numunelerinin mekanik ve optik özelliklerinde renklerin etkisini belirlemek için beyaz, turuncu, pembe, açık mavi, kırmızı, altın sarı, siyah ve kahverengi olmak üzere 8 farklı renkte PLA Plus kullanılmıştır. Tablo 1'de filament üreticisinin belirttiği mekanik özellikler verilmektedir [14].

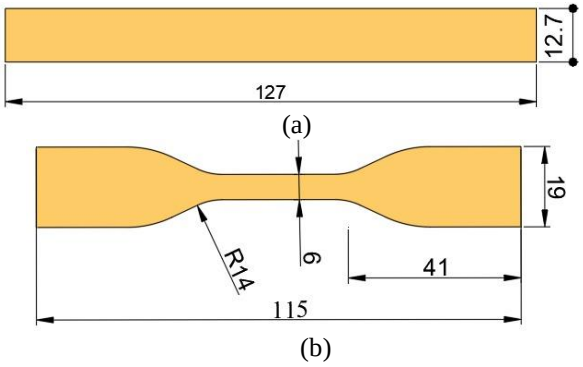
Tablo 1. Kullanılan filamentlerin mekanik özellikleri

Mekanik Özellikler	PLA Plus
Özkütle (g/cm^3)	1.23
Çekme Mukavemeti (MPa)	63
Çekme Uzaması (%)	20
Filament Çapı (mm)	1.75
Marka	eSUN

2.2 Baskı süreci

Çalışmada kullanılan malzemelerin renk, pürüzlülük, parlaklık ve sertlik değerlerinin ölçülmesi amacıyla 80x30x4 mm boyutlarında dikdörtgen yapılı plakalar üretilmiştir. Ayrıca, mekanik özelliklerin tespiti için 3 noktadan eğme (ASTM D790) ve çekme testi (ASTM D638: Tip IV) numuneleri üretilmiştir (Şekil 1).

Tüm numunelerin üretimi, FDM (Fused Deposition Modelling) yöntemi kullanılarak Ender 3S-1 Plus yazıcısında gerçekleştirilmiştir. Yazdırma sürecinde kullanılan parametreler ve ekipmanlar, parçalar arasında tutarlılık sağlamak amacıyla sabit tutulmuştur. Numuneler, %100 doluluk oranı ve 0.4 mm çapındaki pirinç nozül kullanılarak üretilmiştir. Ayrıca 3B yazdırma işlemi, 60 mm/s baskı hızı, 210 °C nozül sıcaklığı ve 60 °C tabla sıcaklığı parametreleri kullanılarak gerçekleşmiştir.



Şekil 1. Numune ölçüleri a) eğme ve b) çekme (Ölçüler mm'dir)

2.3 Malzeme özelliklerini belirlemek için kullanılan testler

Çalışmada kullanılan farklı renklere sahip numunelere, ASTM D638 standardına göre çekme testi ve ASTM D790 standardına göre 3 noktadan eğme testi uygulanmıştır. Denklem (1)'de eğme dayanımı ve Denklem (2)'de şekil değiştirme hesaplama yöntemi verilmektedir.

$$\sigma_{max} = \frac{3}{2} * \frac{P_{max} . L}{b * h^2} \quad (1)$$

Bu denklemde σ: eğme dayanımı (MPa), P_{max}: numuneye uygulanan kuvvet (N), L: mesnet merkezleri arası açıklık (mm), b: numune genişliği (mm), h: numune kalınlığı (mm) ve D: maksimum hareket mesafesi olarak gösterilmiştir.

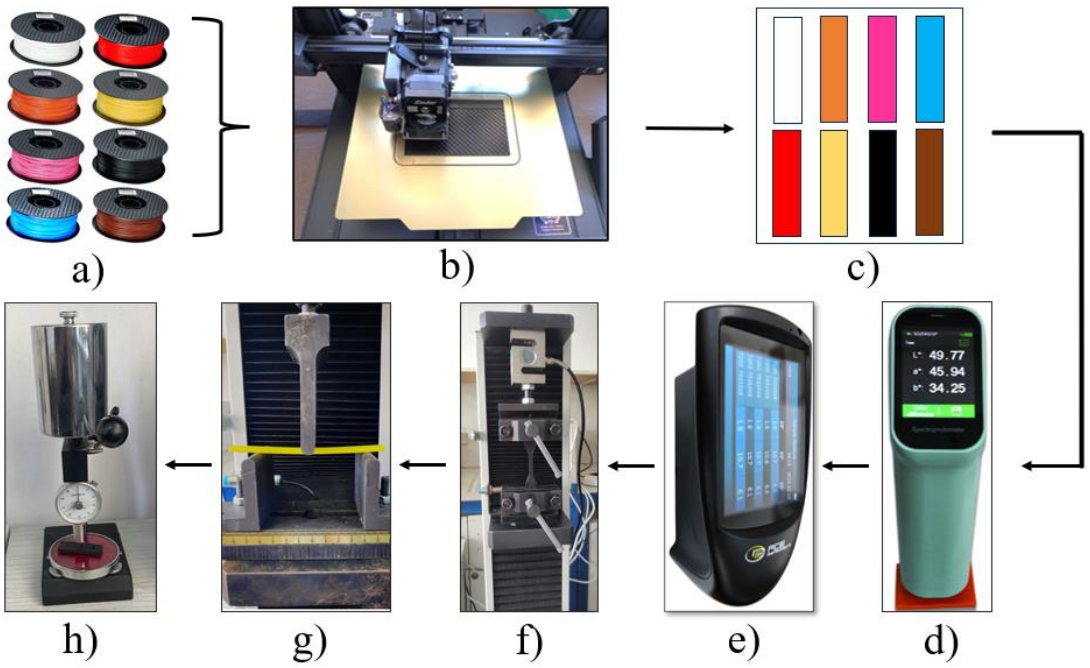
$$\varepsilon_f = 6 * \frac{D . h}{L^2} \quad (2)$$

Oda sıcaklığında 2 mm/dk test hızında gerçekleşen çekme ve eğme testleri için 5kN kapasiteye sahip WDW-5 model üniversal test cihazı kullanılmıştır. Yapılan mekanik testler dört tekrarlı olarak gerçeklemiştir. Numunelerin sertlik ölçümü ASTM D2240 standardına uygun olarak Loyka (Guangdong, Çin) markalı Shore-D durometresi kullanılarak yapılmış, on farklı bölgeden sertlik ölçülmüş ve bu değerlerin ortalaması alınmıştır.

Optik özelliklerin belirlenmesinde ise CHNSpec (Hangzhou, Çin) marka CS410 model spektrokolorimetre kullanılmıştır. Bu sayede renklerin CieLab skalasında L*, a* ve b* değerleri ölçülmüştür. Her bir numune üzerinden dört ölçüm alınmış, farklı renkteki numunelerin renk değerleri bu ölçümlerin ortalamaları alınarak belirlenmiştir. Test numunelerinin parlaklık ölçümü ise 60° açıyla ISO 2813 standardına göre PCE-PGM 100 model (Meschede, Almanya) parlaklık ölçüm cihazında beş tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin yüzey pürüzlülüğü Mitutoyo (Kawasaki, Japonya) marka SJ301 model portatif yüzey pürüzlülüğü cihazıyla ölçülmüştür. Değerler her numuneden beş tekrarlı olarak okunmuş ve ortalamaları alınmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

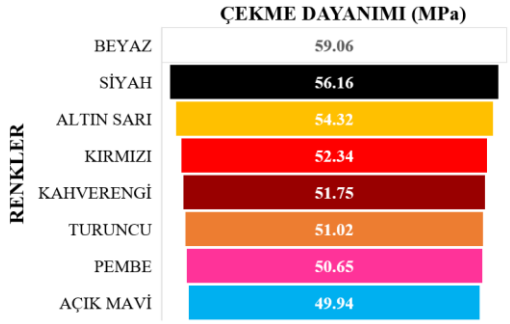
Bu çalışmada 8 farklı renkte (beyaz, turuncu, pembe, açık mavi, kırmızı, altın sarı, siyah, kahverengi) PLA Plus filament kullanılmıştır. Filamentlerden üretilen levhalar 0.2 mm katman kalınlığı ile %100 doluluk oranında basılmıştır. Hazırlanan levhalarda yüzey pürüzlülüğü, renk ve parlaklık ölçümleri yapılmıştır. Daha sonra malzeme dayanımını belirlemek amacıyla sertlik, çekme ve eğme testleri uygulanmıştır (Şekil 2).



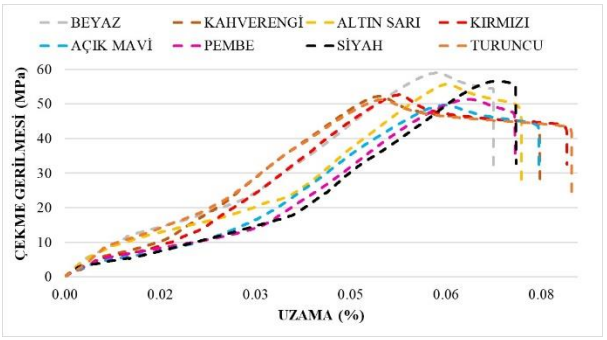
Şekil 2. Deneysel çalışmaların şematik gösterimi, (a) filamentler (b) 3B yazıcı (c) üretilen deney numuneleri (d) renk ölçer (e) parlaklık ölçer (f) çekme testi (g) eğme testi (h) shore d sertlik testi

3.1 Çekme testi sonuçları

Farklı renklerdeki PLA Plus filamentlerden basılan numunelerin çekme dayanımları Şekil 3'te, ortalama değerlere en yakın gerilme-gerinim diyagramları Şekil 4'te verilmiştir. En yüksek çekme dayanımı beyaz renk PLA Plus'da 59.06 MPa olarak belirlenmiştir. En düşük çekme dayanımı ise açık mavi renk PLA Plus'da 49.94 MPa olarak elde edilmiştir. Çekme dayanımları, yüksekten düşüğe doğru beyaz, siyah, altın sarı, kırmızı, kahverengi, turuncu, pembe ve açık mavi olarak sıralanmaktadır. Bu sonuçlar, renk pigmentlerinin PLA Plus dayanımı üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Şekil 4 incelendiğinde çekme mukavemeti arttıkça sünekliğin azaldığı görülmektedir. Beyaz, siyah, altın sarı, kırmızı, kahverengi, turuncu, pembe, açık mavi renklerinin sırasıyla yüzde uzamaları %6.12, %7.26, %8.14, %7.15, %6.97, %7.24, %7.77, %7.12'dir. Çekme mukavemeti en yüksek (59.06 MPa) ve yüzde uzaması en düşük (%6.12) olan beyaz renk olarak belirlenmiştir. En yüksek yüzde uzama %8.14 ile kırmızı renkli filamentte meydana gelmiştir.



Şekil 3. Çekme dayanımının renklere göre dağılımı



Şekil 4. Renklere göre gerilme uzama grafiği

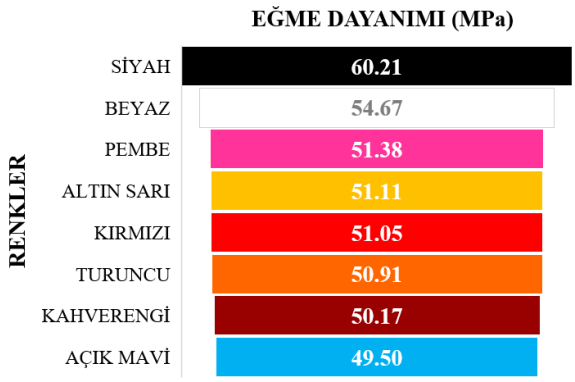
Gao vd. filament renkleriyle ilgili yaptıkları çalışmada %100 doluluk oranına sahip sekiz farklı renkte (kırmızı, altın sarı, açık mavi, yeşil, siyah, turuncu, mor ve yarı saydam beyaz) ABS ile PLA parçalar üzerinde rengin etkisini araştırmışlardır. Araştırma sonuçları, PLA için mor renkli numunelerde ve ABS için yeşil renkteki numunelerde mekanik özelliklerin en iyi değerlere sahip olduğunu ortaya koymuştur. Farklı renklerin kullanıldığı bu çalışmada PLA için rengin malzeme performansı üzerindeki etkisi çekme dayanımı için %14, basma dayanımı için yaklaşık %20 oranında değişmiştir [15]. Bu çalışmanın sonuçları mevcut çalışma ile birbirini doğrulamaktadır.

Çekme testi sonrası numunelerin kırılma yüzeyleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde tüm numunelerde kopmanın aynı yerden olduğu ve hasarın ölçüm bölgesinde kaldığı görülmektedir. Kırılma, numunelerin basım yönü doğrultusunda ve katmanlar arasında gerçekleşmiştir. Aynı zamanda numunelerin kırılma yüzeyleri düz ve keskin kenar şekline sahip olarak birbirine benzemektedir.

Şekil 5. Çekme deneyi sonrasında numunelerin kırılma yüzey görünümleri

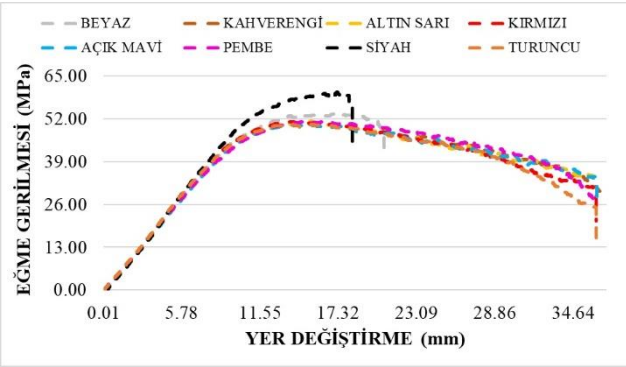
3.2 *Eğme testi sonuçları*

Şekil 6'da renklere göre eğme testinin sonuçları verilmektedir. Eğme mukavemetinin en yüksek değeri siyah renk pigmentine sahip PLA Plus numunede 60.21 MPa olarak bulunmuştur. Eğme mukavemetinin en düşük değeri ise açık mavi renk pigmentine sahip PLA Plus numunede 49.50 MPa olarak ölçülmüştür. Eğme mukavemeti değerleri yüksekten düşüğe doğru sıralandığında sırasıyla siyah, beyaz, pembe, altın sarı, kırmızı, turuncu, kahverengi ve açık mavi renkli parçalarda olduğu görülmüştür.



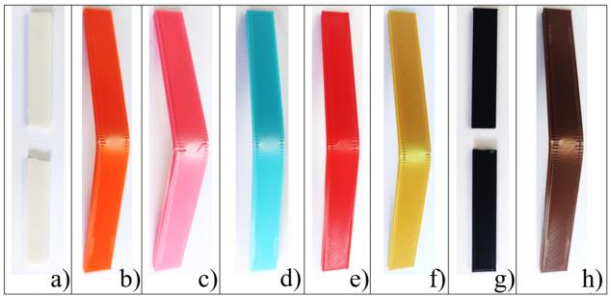
Şekil 6. Eğme dayanımının renklere göre değişim grafiği

Şekil 7'de eğme testi sonrası eğme gerilmesi-yer değiştirme grafiği verilmiştir. Renge göre çatlak başlama mesafeleri farklılık göstermiştir. Siyah, beyaz, pembe, altın sarı, kırmızı, turuncu, kahverengi ve açık mavi renkleri sırasıyla çatlak başlama mesafeleri 17.53, 19.54, 36.95, 37.38, 35.23, 35.12, 35.27, 35.67 mm olarak belirlenmiştir. En yüksek eğme mukavemeti 60.21 MPa ve en erken çatlak oluşumu 17.53 mm ile siyah renkli filamentte meydana gelmiştir. Yüksek eğilme mukavemetine sahip siyah ve beyaz renkli numuneler tamamen kırılmıştır. Eğme mukavemeti düştükçe süneklik artmış ve kırılma yerine yüzeysel çatlaklar oluşmuştur. En düşük eğme mukavemetine (49.50 MPa) sahip açık mavi renkli numunelerin yüzeyinde çatlaklar az oluşmuştur.



Şekil 7. Renklere göre eğilme gerilmesi-yer değiştirme grafiği

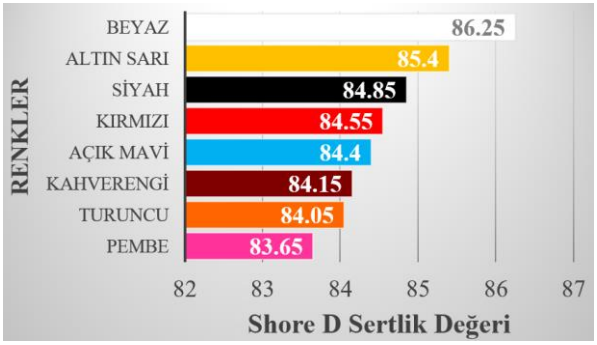
Şekil 8'de eğme testi sonrasında numunelerin kırılma yüzeyleri gösterilmiştir. Şekil 8 incelendiğinde eğme testinde numunelere uygulanan yükün bazı numunelerde (kahverengi, altın sarı, kırmızı, açık mavi, pembe ve turuncu) yükleme hattı boyunca çatlak oluşturduğu görülmektedir. Bu numuneler tam kırılma gerçekleşmeden plastik deformasyona uğramıştır. Bununla birlikte, beyaz ve siyah numuneler eğme testinde tamamen kırılmıştır.



Şekil 8. Eğme testi sonrası parça kırılma yüzeyleri a) beyaz, b) turuncu, c) pembe, d) açık mavi, e) kırmızı, f) altın sarı, g) siyah ve h) kahverengi

3.3 *Sertlik ölçümü sonuçları*

Şekil 9'da sertlik değerinin renklere bağlı değişimi verilmektedir. Sertlik değeri en yüksek beyaz renk pigmentine sahip PLA Plus'da görülürken en düşük değer ise pembe renkli PLA Plus'da tespit edilmiştir. Sertlik değerleri yüksekten düşüğe göre beyaz, altın sarı, siyah, kırmızı, açık mavi, kahverengi, turuncu ve pembe olarak sıralanmaktadır.

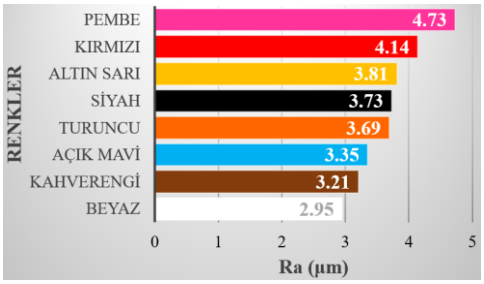


Şekil 9. Renklere göre sertlik değerinin değişimi

3.4 *Yüzey pürüzlülüğü sonuçları*

Şekil 10'da renge bağlı olarak aritmetik ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri verilmiştir. En yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri pembe renkli PLA Plus'da 4.73 µm, en düşük yüzey pürüzlülüğü ise beyaz renkli PLA Plus'da 2.95 µm olarak ölçülmüştür. Pembe ve kırmızı numunelerin yüzey pürüzlülüğü diğerler numunelere göre daha yüksek ve birbirine yakın çıkmıştır.

Yüzey pürüzlülük değerleri yüksekten düşüğe doğru pembe, kırmızı, altın sarı, siyah, turuncu, açık mavi, kahverengi ve beyaz renkli numunelerden okunmuştur. Okunan yüzey pürüzlülüğü değerleri 2.95-4.73 µm aralığında bulunmuştur.



Şekil 10. Renk değişimine bağlı yüzey pürüzlülük değerleri

3.5 *Renk ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi*

1976 yılından beri CIE L*a*b* olarak bilinen bir renk sistemi renk ölçümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. CIE renk sisteminde renk üç koordinatla gösterilir: "L*, a* ve b*". Bu sisteme göre L* (açıklık-koyuluk beyaz için L* = 100, siyah için L* = 0), a* (yeşil-kırmızı, +a∗ kırmızılığı, −a* yeşili) ve b* (açık mavi-sarı, +b* sarılığı, −b* maviyi) temsil edilen parametrelerdir. L*a*b* koordinatlarının ölçülmesi, bu sistem sınırları içerisinde herhangi bir renk tonunun tanımlanmasına olanak sağlar [16]. Şekil 11'de deney numunelerinden alınan renk ölçümleri verilmiştir.

RENK		DEĞER	RENK		DEĞER
BEYAZ	L*	81.43	TURUNCU	L*	60.47
	a*	-1.48		a*	49.48
	b*	2.66		b*	46.42
PEMBE	L*	69.15	AÇIK MAVİ	L*	64.54
	a*	54.63		a*	-30.30
	b*	6.27		b*	-16.47
KIRMIZI	L*	46.82	ALTIN SARI	L*	67.18
	a*	49.59		a*	12.83
	b*	30.74		b*	56.61
SİYAH	L*	17.39	KAHVERENGİ	L*	37.39
	a*	0.09		a*	9.09
	b*	-3.48		b*	13.90

Şekil 11. Renk ölçüm testi sonuçları

Şekil 12 (a)'da bir rengin konumu için üç boyutlu dikdörtgen bir koordinat sistemi sunulmuştur. CIE L*a*b* değeri bir rengi bu ölçekte 3 boyutlu koordinatlarıyla gösterir. Deneylerde kullanılan malzemelerin renklerinin koordinat sisteminde yerleştirilmesi yapılmış ve Şekil 12 (b)'de verilmiştir.

3.6 *Parlaklık Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi*

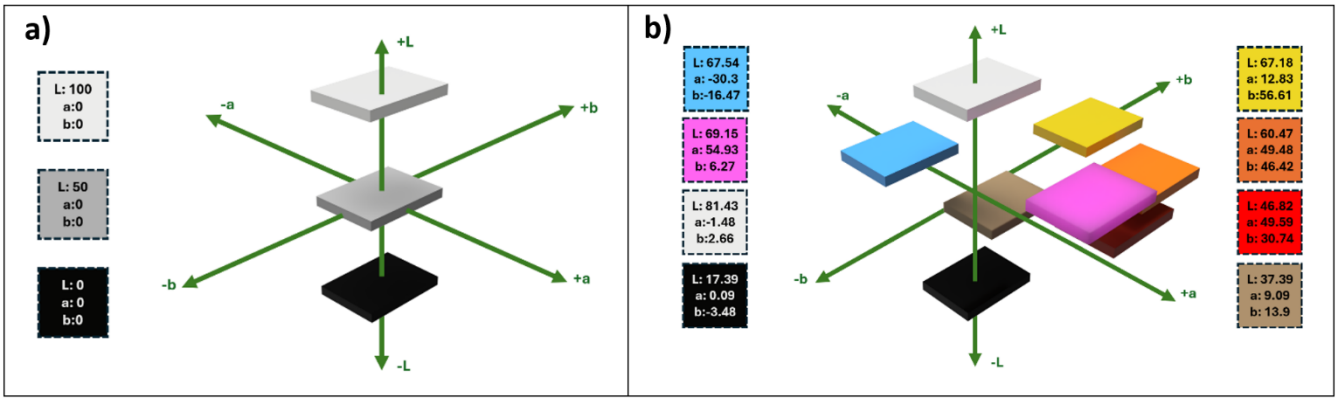
Parlaklık; bir cismin yüzeyinden yansıyan ışık yoğunluğunun, yüzeye gelen ışık yoğunluğuna oranı olarak ifade edilen bir optik özelliktir. Sektörel ihtiyaçlara bağlı olarak malzeme ve ürün değerlendirmelerinde doğru olarak ölçmek çok önemlidir [17]. Parlaklık, öncelikle malzemenin doğası ve yüzey pürüzsüzlüğü tarafından belirlenir [18]. Parlaklık ölçümleri numunelerin parlak, yarı parlak veya mat olup olmadığını anlamaya yardımcı olmaktadır.

Genel olarak parlaklık ölçümlerinde 20° çok parlak katmanların, 60° hem mat hem de parlak katmanların, 85° ise mat katmanların yüzey parlaklığını belirlemek için kullanılırlar [19].

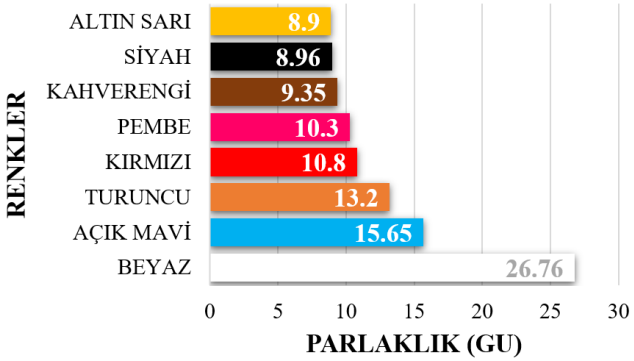
Parlaklık birimi, Gloss Unit (GU)'dir. Bu çalışmada, 3B yazıcıda üretilen parçalar basıldıktan sonra ilk olarak gözle muayene edilmiştir. Parça yüzeylerinin aynı cins malzemeden üretilmesine rağmen parlaklık ve matlık durumlarının birbirinden farklı olduğu gözlemlenmiştir.

Daha sonra, numunelerin parlaklık değerleri ölçüm cihazıyla ölçülmüş ve 8.9-26.76 GU arasında bulunmuştur. Şekil 13'te numunelerden alınan parlaklık değerleri verilmiştir.

Parlaklık değerlendirilmesinde en parlak yüzey, beyaz PLA Plus numunelerde görülmüştür. Bu durum, parçanın yüzey pürüzlülüğü azaldıkça parlaklığının artarak yüzeyinin ayna gibi parlak olması fikrini desteklemektedir. Pembe ve kırmızı PLA Plus numunelerin yüzey parlaklıkları ise birbirine yakın ve beklenildiği gibi düşük çıkmıştır. Altın sarı ve siyah numunelerin parlaklıkları ile yüzey pürüzlülük değerleri arasında bir ilişki kurulamazken, diğer numunelerin parlaklıkları yüzey pürüzlülükleriyle doğrudan bağlantılı olduğu görülmüştür



Şekil 12. CIE L*a*b* değerinin 3 boyutlu koordinatlarının gösterimi: a) şematik renk sistemi b) deney malzemelerinin renklerine göre yerleştirilmesi



Şekil 13. 60° ölçüm geometrisi için parlaklık ölçüm sonuçları

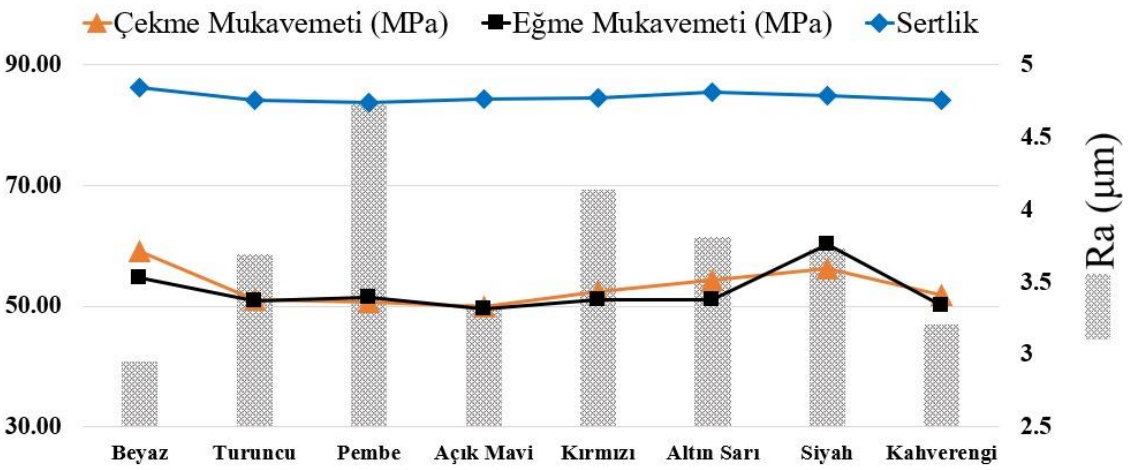
4 Sonuçlar

Plastik malzemeler hem prototipleme hem de üretimde diğer 3B baskı malzemelerinden nispeten daha uygun maliyetli oldukları için halen kullanılan en yaygın malzeme grubudur. Geniş kullanımları nedeniyle, plastikler mekanik özellikleriyle ilgili birçok varyasyona sahiptir ve orta-yüksek performanslı uygulamalar yapılabilir. 3B parça basımında, PLA malzeme parlaklık ve renk özelliklerinin çeşitliliği sebebiyle çok popülerdir. Malzemelerde estetik görünüm - özellikle renk- ürünleri farklılaştırmada kritik bir rol oynar. Örneğin filamentte mavi renk, istenmeyen kontaminasyon durumunda gıda ürünlerindeki parçaların görsel olarak veya optik dedektörlerle tespit edilmesini kolaylaştırması sebebiyle tercih edilebilmektedir [20]. UV ışınlarına dayanıklılıkla birlikte renkli veya şeffaf görünüm isteyen ambalaj sektörünün beklentisiyle, parçalarda yanmazlık ve mukavemetin ön plana çıktığı otomotiv sektöründeki beklenti birbirinden farklı olacaktır. Filament renginin, pratik uygulamalarda parçaların performansı/mekanik özellikleri üzerinde herhangi bir etkisi var mıdır? Profesyonel anlamda 3B baskı ile ilgilenen kullanıcıların cevabını aradığı sorulardan biri budur [21]. Filamentlerin içine katılan renk veren maddelerin kaynağı, miktarı ve kimyasal içerikleri 3B yazıcı kullanıcısı tarafından bilinmemektedir.

Renk veren maddeler organik ve inorganik pigmentlerden siyah ve titanyum dioksit için karbona kadar değişebilir. Bu nedenle renk ve mukavemet ilişkisi hakkında kesin bir çerçeve çizmek ve genelleme yapmak kolay değildir. Elbette 3B yazıcı kullanıcısı ticari filamentler yerine kendi filamentini üreterek kalite, renk ve malzeme özellikleri üzerinde daha fazla kontrol sağlayabilir. Fakat, filament üretmek ile 3B baskı almak birbirinden ayrı iki alandır. Filament üretimi ekstra ekipman ve uzmanlık istediğinden, ticari filamentlerin kullanımı daha kolay ve yaygındır.

Bu çalışmada eSUN filament markasına ait sekiz farklı renkte numune kullanılmıştır. Şekil 14'de çekme mukavemeti, eğme mukavemeti, sertlik ve yüzey pürüzlülük değerleri birlikte verilmiştir. En yüksek çekme mukavemeti (59.06 MPa), en düşük yüzey pürüzlülük değeri (2.95 µm) ve en yüksek parlaklık değeri (26.76 GU) beyaz renk PLA Plus'da tespit edilmiştir. Çekme mukavemetinde renk etkisi oranı yaklaşık %18 olmaktadır. Pembe renk PLA Plus'da ise en düşük sertlik değeri (83.65 Shore D) ve en yüksek yüzey pürüzlülük değeri (4.73 µm) görülmüştür. Sertlik değerinde renk etkisi yaklaşık %3 olurken yüzey pürüzlülüğünde bu değer yaklaşık %60 olmaktadır. Eğme değerlerinde renk etkisi yaklaşık %22 oranında bir fark çıkarmaktadır.

PLA Plus malzeme numunelerinin birbirinden farklı dayanım değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, PLA Plus numunelerin bazılarında numune üretim sürecinde katmanlar arasında sağlanan bağın diğerlerine göre daha iyi olmasıdır. Bu durumun filament üretim sürecinde PLA Plus malzemeye renk vermek için eklenen boya maddelerden ve bu maddelerin malzemeyle uyumundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Malzeme renginin PLA Plus'nın mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuç diğer araştırmalardan elde edilen sonuçlarla örtüşmektedir [11, 22]. Üretim sırasında yapılan renklendirme işlemleri, mekanik özelliklerin yanı sıra ısı işleme ve mekanik işleme gibi çeşitli adımlarla optik özellikleri etkileyebilir [23].



Şekil 14. Renklere göre mekanik özelliklerin değişimi

Renklendiricilerin çeşidi, plastiklerin optik özelliklerini etkileyebilir [24]. Bunun yanında pürüzsüz ve düzgün bir yüzeyin, pürüzlü veya düzensiz bir yüzeyden daha yüksek bir parlaklık değerine sahip olacağı bilinmektedir. Pürüzsüz yüzeyler ışığı homojen olarak yansıtmaktadır [25, 26]. Parlaklık ölçümlerinin sonuçları, pürüzlülük ve parlaklık arasında bir bağlantı olabileceğini göstermektedir. Farklı açılardaki parlaklık değerlerinin değişkenliği, dolgu maddeleri veya pigmentlerle oluşan düzensiz yüzeyle ilişkili olabilir [27]. Bununla beraber renk, pürüzlülük ve parlaklığın birlikte incelemesinin yanında malzemelerin ışıkla etkileşiminin de ne olduğunun kapsamlı değerlendirilmesi bu alanda yeni araştırma konuları oluşturma potansiyeli barındırmaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %2

Kaynaklar

[1] Onlinefilament, Filament nedir? filament çeşitleri nelerdir?,https://www.onlinefilament.com/blog/icerik/filament-nedir-filament-cesitleri-nelerdir?srsltid=AfmBOoqDV_DP5ac07caSfEk7Q5MoOmg-QaiP90Z1SB3IKaZJW4575MYB, Erişim 3 Kasım 2024.

[2] R. Narain, Polymer Science and Nanotechnology: Fundamentals and Applications. Elsevier, Amsterdam 2020.

[3] Y. Kuruoğlu, M. Akgün, H. Demir, FDM yöntemiyle üretilen ABS, PLA ve PETG numunelerin yüzey pürüzlülüğü ve çekme dayanımının modellenmesi ve optimizasyonu. International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry 6(3), 358-369, 2022. https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1148923.

[4] M.S. Kamer, Ş. Temiz, H. Yaykaşlı, A. Kaya, 3 Boyutlu yazıcı ile farklı renklerde ve farklı dolgu desenlerinde üretilen çekme test numunelerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi 26(3), 829-848, 2021. https://doi.org/10.17482/uumfd.887786.

[5] J.B. Soares, J. Finamor, F.P. Silva, L. Roldo, L.H. Cândido, Analysis of the influence of polylactic acid (PLA) colour on FDM 3D printing temperature and part finishing. Rapid Prototyping Journal 24(8), 1305-1316, 2018. https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2017-0177.

[6] A.P. Valerga, M. Batista, J. Salguero, F. Girot, Influence of PLA filament conditions on characteristics of FDM parts. Materials 11(8), 1322, 2018. https://doi.org/10.3390/ma11081322.

[7] M.M. Hanon, L. Zsidai, Comprehending the role of process parameters and filament color on the structure and tribological performance of 3D printed PLA. Journal of materials research and technology 15, 647-660, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.061.

[8] I. Tamaşag, C. Suciu, I. Beşliu-Băncescu, C. Dulucheanu, D.-A. Cerlincă, Experimental study on the possibilities of FDM direct colour printing and its implications on mechanical properties and surface quality of the resulting parts. Polymers 14(23), 5173, 2022. https://doi.org/10.3390/polym14235173.

[9] R. Hamid, N. Marnyi, F. Hamezah, T. Ito, S. Linke, Effect of different PLA filament colours and process parameters towards the tensile strength of 3d printed parts. Proceedings of Malaysian Technical Universities Conference on Engineering and Technology (MUCET), 168-169, 2021.

[10] D. Frunzaverde, V. Cojocaru, N. Bacescu, C.-R. Ciubotariu, C.-O. Miclosina, R.R. Turiac, G. Marginean, The influence of the layer height and the filament color on the dimensional accuracy and the tensile strength of FDM-printed PLA specimens. Polymers 15(10), 2377, 2023. https://doi.org/10.3390/polym15102377.

[11] A. Pandžić, D. Hodžić, A. Milovanović, Influence of material colour on mechanical properties of PLA material in FDM technology. Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium, DAAAM International, 555-561, 2019. https://doi.org/10.2507/30th.daaam.proceedings.075.

[12] M. Aydın, F. Yıldırım, E. Çantı, Farklı yazdırma parametrelerinde PLA filamentin işlem performansının incelenmesi. International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry 3(2), 102-115, 2019.

[13] A. Nergizhan, O. Koçar, C. Altuok, Investigation of the weldability of PLA Plus sheets with different infill ratios by friction stir welding. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 1-1, 282-296, 2024. https://doi.org/10.29109/gujsc.1399512.

[14] eSUN, PLA Plus, https://www .esun3d.com/uploads/eSUN_PLA+-Filament_TDS_V4.0.pdf, Erişim 1 Kasım 2024.

[15] G. Gao, F. Xu, J. Xu, Z. Liu, Study of material color influences on mechanical characteristics of fused deposition modeling parts. Materials, 15(19), 7039, 2022. https://doi.org/10.3390/ma15197039.

[16] C. Aydemir, S. Yenidoğan, A. Karademir, E. Arman, Effects of color mixing components on offset ink and printing process. Materials and Manufacturing Processes, 32(11), 1310-1315, 2017. https://doi.org/10.1080/10426914.2017.1279323.

[17] C. Aydemir, The effect of paper roughness on print color deviation, lightfastnes s and print gloss. Marmara Journal of Pure and Applied Sciences, 26(3), 97-107, 2014. https://doi.org/10.7240/mufbed.86137.

[18] L.W. McKeen, The Effect of Long Term Thermal Exposure on Plastics and Elastomers, William Andrew 2021.

[19] Korozyon Doktoru, Parlaklık (Gloss) nedir?. https://www.korozyondoktoru.org/parlaklik-gloss-nedir-nasil-olculur-parlaklik-seviyeleri-nelerdir/, Erişim 05 Aralık 2024.

[20] Sculupeto, Food grade PA12 (blue). http://www.https://www.sculpteo.com/en/materials/sls-material/food-grade-pa12-blue/, Erişim 25 Mart 2025.

[21] Prusa3D, Do coloring additives affect filament material properties?. https://forum.prusa3d.com/forum/english-

forum-general-discussion-announcements-and-releases/do-coloring-additives-affect-filament-material-properties/, Erişim 26 Mart 2025.

[22] B. Wittbrodt, J.M. Pearce, The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components, Additive Manufacturing, 8, 110-116, 2015. https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.09.006.

[23] Intertek, Optical properties of polymers, https://www.intertek.com/polymers-plastics/optical-properties/, Erişim 5 Ağustos 2024.

[24] Plasma Plastik, Plastiklerin seçim kriterleri. https://plasmaplastik.com/blog/plastiklerin-secim-kriterleri, Erişim 17 Nisan 2024.

[25] D. Šarić, A.S. Sole, Visually significant dimensions and parameters for gloss, Journal of Imaging 10(1), 10, 2023. https://doi.org/10.3390/jimaging10010010.

[26] J. Gim, E. Han, B. Rhee, W. Friesenbichler, D.P. Gruber, Causes of the gloss transition defect on high-gloss injection-molded surfaces. Polymers, 12(9), 2100, 2020. https://doi.org/10.3390/polym12092100.

[27] Q. Yong, J. Chang, Q. Liu, F. Jiang, D. Wei, H. Li, Matt polyurethane coating: correlation of surface roughness on measurement length and gloss. Polymers, 12(2), 326, 2020. https://doi.org/10.3390/polym12020326

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 846-854

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

A practical study of multi-layer high gain U-slot printed antenna array design

Çok katmanlı yüksek kazançlı U-yarık anten dizisi tasarımının pratik bir çalışması

Gülden Günay Bulut Öner[1,*], Asena Melike Çayan[2], Suad Başbuğ[3], Yasemin Altuncu[4]

[1,2,3] *Nevşehir Hacı Bektaş Veli University, Electrical and Electronics Engineering Department,50300, Nevşehir, Türkiye*
[4] *Niğde Ömer Halisdemir University, Electrical and Electronics Engineering Department, 51240, Niğde, Türkiye*

Abstract

In this paper, we propose the design of a multi-layer high-gain U-slot printed antenna array consisting of 2x2 elements.The design consists of four layers: The first layer is a ground plane as a single-sided copper clad FR4. The second layer, made from PETG material, is introduced to enhance the bandwidth of the antenna. Microstrip antenna elements and feed lines are etched into the top segment of the third layer. The fourth layer is a directive structure used to increase the gain of the antenna array, which consists of 8x8 64-elements microstrip patches separated by air gap from the main body. This parasitic layer is supported by four rods fixed to the third layer. According to the results, the simulated center frequency of the proposed design is 2.61 GHz. The maximum gain simulated at 2.61 GHz is 12 dBi, and the measured impedance bandwidth is 14.27%. Additionally, in this study, the fabrication and measurements of the presented antenna were carried out to validate the simulation results. Comparisons between the simulation and measurement data show good agreement in the S_{11} parameter and radiation pattern graphs.

Keywords: Antenna array, High gain, Multi-layer, U-slot antenna

Öz

Bu makalede, 2x2 elemanlardan oluşan çok katmanlı yüksek kazançlı U-yarık anten dizisinin tasarımı sunulmaktadır. Tasarım dört katmandan oluşmaktadır: Birinci katman, tek yüzü bakır kaplanmış FR4 malzemesinden oluşan bir toprak düzlemidir. İkinci katman, antenin bant genişliğini artırmak için PETG malzemesinden yapılmıştır. Üçüncü katmanın üst segmentine mikroşerit anten elemanları ve besleme hatları kazınmıştır. Dördüncü katman, anten dizisinin kazancını artırmak için kullanılan yönlendirilmiş bir yapıdır ve bu yapı, ana gövdeden hava boşluğu ile ayrılmış 8x8'lik 64 elemanlı mikroşerit yama elemanlarından oluşmaktadır. Bu parazitik katman, üçüncü katmana sabitlenmiş dört çubukla desteklenmektedir. Sonuçlara göre, önerilen tasarımın simüle edilmiş merkezi frekansı 2.61 GHz'dir. 2.61 GHz'de simüle edilen maksimum kazanç 12 dBi ve ölçülen empedans bant genişliği %14.27 olarak elde edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada, simülasyon sonuçlarının doğrulanması amacıyla sunulan antenin üretimi ve ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ve ölçüm verileri arasındaki karşılaştırmalar S_{11} parametresi ve ışıma örüntüsü grafiklerinde iyi bir uyum olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Anten dizisi, Yüksek kazanç, Çok katman, U-yarık anten

1 Introduction

High gain, small size and wideband antennas are frequently demanded in the wireless communication applications to improve the data quality and mobility. In this regard, microstrip patch antennas are preferred that they have advantages such as compact size, easy production and low cost compared to the conventional dipole antennas [1]. Microstrip patch antenna is a special type of printed antenna manufactured using methods similar to those used in printed circuits [2]. A conventional microstrip antenna consists of a substrate which has a certain thickness and dielectric constant on a ground plane and a conductive patch on it [3]. Alongside the advantages mentioned above, the microstrip patch antennas have also some disadvantages such as narrow bandwidth and low gain [4]. These disadvantages can be eliminated by design changes made on microstrip patch antennas [5]. Slotted structure used on microstrip patch antennas is one of such design changes [6]. Microstrip patch antennas designed by adding slotted structures have wider bandwidth by comparison with conventional microstrip patch antennas [7]. Microstrip antenna arrays generally consist of patch radiator elements on the same printed circuit board. Besides, it is well known that the gain can be improved by using antenna arrays which cannot be achieved with a single antenna element [8]. Antenna parameters such as gain and bandwidth in microstrip arrays can also be improved by modifications on the ground plane [9-12]. In order to improve the radiation properties, microstrip parasitic elements [13, 14], superstrate structures [15, 16], parasitic layer antenna arrays [17-20], and multi-layer antenna designs [21-23] are used. Also, in the antenna literature 3D printed antennas are frequently studied due to their advantages such as ease of

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ggunaybulut@nevsehir.edu.tr. (G. G. Bulut Öner)
Geliş / Received: 20.02.2025 Kabul / Accepted: 15.04.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1643101

production, transportation cost, and alternative design possibilities in antenna manufacturing compared to classical antenna production techniques [24-26]. Many plastic filaments such as Conformal Polylactic Acid (PLA) [27], Polylactic Acid (PLA) [28, 29], Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) [30, 31] and Polietilen Tereftalat Glikol (PETG) [32] are commonly used in 3D printed antenna technology. A 2x2 multilayer, broadband antenna array design is presented in [33]. In this study, by using partially reflecting surface (PRS) and reactive impedance surface (RIS) structures, the bandwidth of the design is increased, less gain ripple is obtained and design miniaturization is achieved compared to the design obtained by using only RIS structure. A novel multilayer microstrip patch antenna array fed by substrate-integrated waveguide cavities is reported for Ku-band applications [34]. A dual polarized aperture coupled 2x2 antenna array is fabricated and measured in reference [35]. In [36] the design and fabrication of a stacked, circularly polarized 2x2 meta surface antenna array is realized. In the study given in [37], a 2x2 antenna array design with multilayer quasi-AMC superstrate and Fabry-Perot structure is presented.

In this study, a high gain 2x2 elements multi-layer antenna array design is presented. Multi-layer geometry is designed to increase the bandwidth of the antenna array. With the usage of the PETG material, parameters such as gain and bandwidth can be increased compared to standard single-layer microstrip antenna arrays. By using PETG substrate produced with the help of a three-dimensional printer, antenna substrate with the desired infill and thickness can be produced and in this way, basic antenna parameters such as gain and bandwidth of the antenna design can be improved. An 8x8 64 elements of square microstrip patches are used to increase the gain. This design provides advantages such as ease of production, low cost, high gain, narrow beamwidth and compact profile.

2 Antenna design and analysis

2.1 Antenna array evolution process

In this section, we outline the design stages of the final multi-layer 2x2 microstrip antenna array. The evolution begins with a single-layer U-slot microstrip antenna design operating at a frequency of 2.45 GHz. Following the success of the initial design and simulation, we proceed to the second stage, where a multilayer U-slot microstrip antenna design and simulation are conducted. The introduction of a multilayer structure aims to enhance the bandwidth and gain parameters of the previous design. In the third stage, we realize a multilayer 2x2 4-element microstrip antenna design to further improve the existing radiation parameters. Finally, the design process concludes with the addition of a parasitic layer to the 4-elements U-slot microstrip antenna array, resulting in increased gain compared to the previous stage. The design evolution process is illustrated in Figure 1.

While carrying out the antenna design stages, traditional microstrip patch antenna design formulas [38] are used as a starting point and then the necessary size optimizations are carried out. The initial design formulas in question are given in Equation (1).

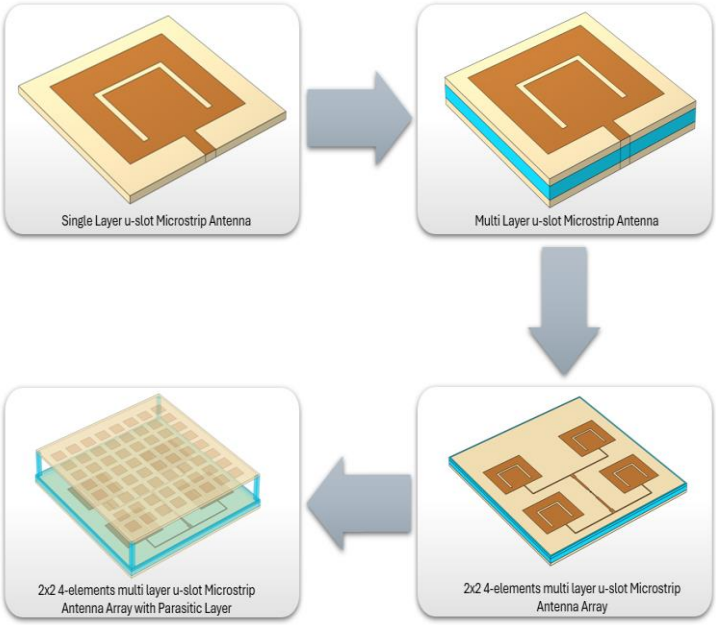


Figure 1. The evolution process of the final antenna array design.

$$\varepsilon_{reff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2}\left[1 + 12\frac{h}{W}\right]^{-1/2} \quad (1.a)$$

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412\frac{\left(\varepsilon_{reff} + 0.3\right)\left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{\left(\varepsilon_{reff} - 0.258\right)\left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (1.b)$$

$$L_{eff} = L + 2\Delta L \quad (1.c)$$

$$W = \frac{v_0}{2f_r}\sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}} \quad (1.d)$$

The design parameters for the single-element antenna are depicted in Figure 2, while the optimized values of these parameters for both single-layer and multi-layer antennas are detailed in Table 1. In the single-layer U-slot microstrip antenna design, an FR4 substrate with a dielectric constant (ε_r) of 4.15 and a substrate height (h) of 1.59 mm are chosen due to its several advantages, including low cost and easy fabrication. For the multi-layer U-slot microstrip antenna design, aimed to enhance the antenna parameters such as gain and bandwidth, a sandwich geometry consisting of three layers is utilized. The first and third layers comprise FR4 substrate with a dielectric constant of 4.15 and a substrate height of 1.59 mm. Between these FR4 layers, a layer of Polietilen Tereftalat Glikol (PETG) material is inserted, with a dielectric constant of 2.62 and a thickness (t) of 3 mm.

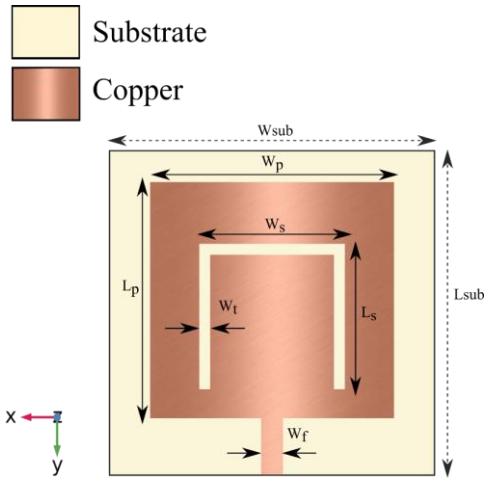


Figure 2. Dimensions of single element U-slot rectangular patch antenna

Table 1. Optimized design parameters of single layer and multi-layer U-slot microstrip antenna

Symbol	Parameter	Value (mm)
Single layer U-slot microstrip patch antenna	Patch Width (W_p)	33.5
	Patch Length (L_p)	32.5
	Slot Width (W_s)	20
	Slot Length (L_s)	20
	Slot Thickness (W_t)	1.5
	Feed Width (W_f)	3
Multi-layer U-slot microstrip patch antenna	Patch Width (W_p)	36
	Patch Length (L_p)	34.58
	Slot Width (W_s)	20
	Slot Length (L_s)	20
	Slot Thickness (W_t)	1.5
	Feed Width (W_f)	3

In order to illustrate the contribution of each design stage, the reflection coefficient plots and realized far field gain plots to the corresponding design stage are presented in Figure 3 and 4, respectively.

When the simulated reflection coefficient plots in Figure 3 are examined, it can be clearly seen that the U-slot microstrip antenna with multi-layer structure exhibits a wider impedance bandwidth (%3.18) compared to the single-layer U-slot microstrip antenna (%1.55). Furthermore, it is observed that the 4-element U-slot microstrip patch antenna array design with a multi-layer structure demonstrates a much wider impedance bandwidth (%12.86) compared to the single-element multi-layer U-slot microstrip patch antenna design. Finally, when the multilayer 2x2 U-slot antenna array is compared with the version with a parasitic layer added to this design, it is observed that the impedance bandwidth decreased to %11.49 and this layer which is added to increase the gain of the design also shifts the center frequency of the current design from 2410 MHz to 2610 MHz.

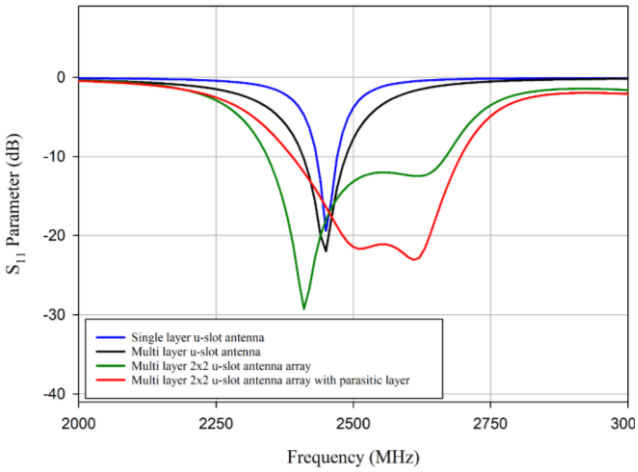


Figure 3. Simulated S_{11} plots of single layer U-slot antenna, multi-layer U-slot microstrip antenna and multi-layer 2x2 4-elements multi-layer antenna array.

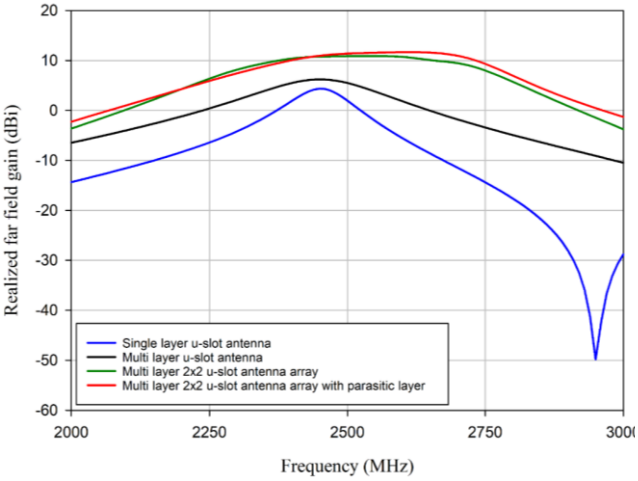


Figure 4. Realized far field gain (dBi) plots of single layer U-slot antenna, multi-layer U-slot microstrip antenna and multi-layer 2x2 4-elements multi-layer antenna array

Considering the realized far field gain (dBi) plots given in Figure 4, it can be observed that the gain of the single-layer U-slot microstrip antenna design with a center frequency of 2450 MHz increases from 4.37 dBi to 6.22 dBi with the multi-layer U-slot microstrip patch antenna design at the same operating frequency. Comparing the multi-layer single-element U-slot microstrip antenna design with the multi-layer 4-element U-slot microstrip patch antenna array in terms of gain, it is evident that the realized far field gain value rises from 6.22 dBi to 10.89 dBi. As the final stage of the design, the addition of a parasitic layer to the multi-layer 4-element U-slot microstrip antenna array further increases the gain value of the current design from 10.89 dBi to 12 dBi.

The 2D radiation pattern plot of each design stage is given in Figure 5.

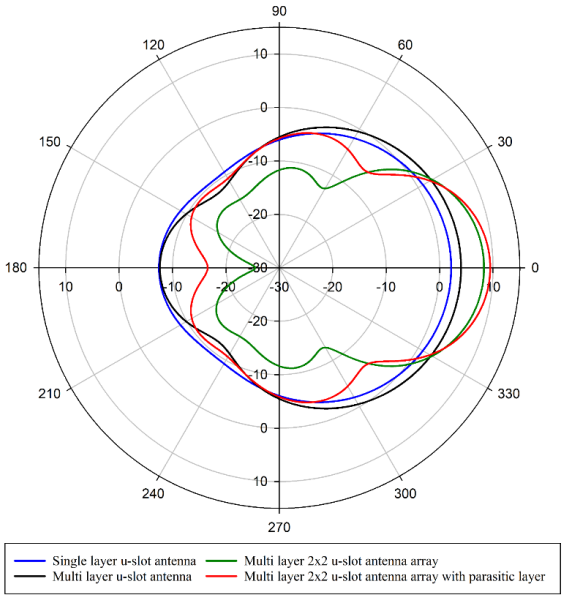


Figure 5. 2D Radiation pattern plots of single layer U-slot antenna, multi-layer U-slot microstrip antenna, multi-layer 2x2 antenna array, and multi-layer 2x2 antenna array with parasitic layer.

2.2 Antenna array design

The 2x2 U-slot microstrip antenna array design is carried out after the successful design and simulation of the single element U-slot microstrip antenna. The distance between the antenna array elements is considered to adjust within λ and $\lambda/2$. If the distance is set to greater than λ, grating lobes emerge on the radiation pattern. On the other hand, if the distance between the adjacent element is too lower than λ/2, it may cause undesired mutual coupling.

The proposed 2x2 4-elements antenna array design consisting of four layers is given in Figure 6. FR4 material with dielectric constant of 4.15 and the thickness of 1.59 mm is used as the dielectric substrate material for Layer 1, Layer 3 and Layer 4. PETG material with the dielectric constant of 2.62 and with the thickness of 3 mm is used as the dielectric substrate material for Layer 2. The three layers at the bottom are in contact with each other whereas the top layer is separated from the others by an air gap of 18.4 mm and is supported by rods made of PETG material. In this sandwich design, PETG material on Layer 2 is used to increase the bandwidth. An 8x8 elements of square microstrip patches printed on the FR4 material on Layer 4 are used to increase the gain of the array. Microstrip antennas are etched in the upper surface of Layer 3. The upper surface of this layer also contains the transmission lines. A detailed version of transmission line structure used in the design is given in Figure 6. These transmission lines consist of 50Ω and 100Ω lines and 70.71Ω quarter wavelength (λ/4) converters in order to eliminate the impedance mismatches. The quarter-wavelength transformers and transmission lines are initially designed by using the basic design formulas on a single-layer array and subsequently the whole array design is optimized by considering the multilayer structure. The initial design formulas for the antenna array implemented with quarter-wavelength transformers are provided in Equation (2).

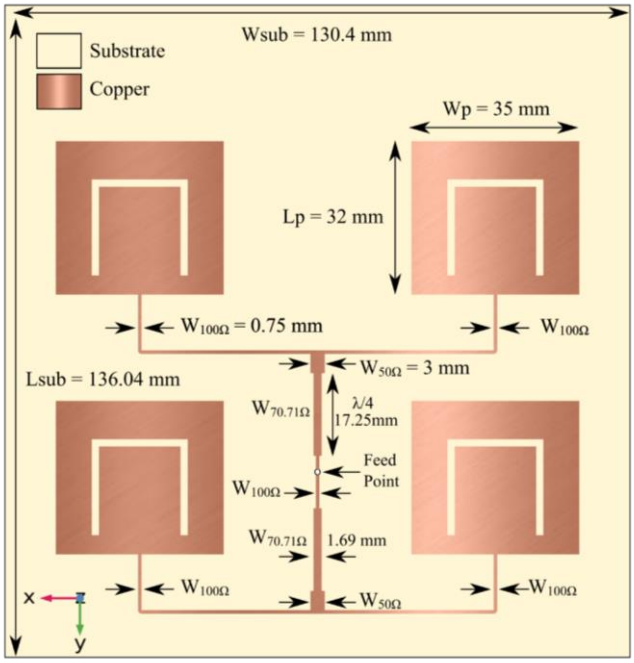


Figure 6. Microstrip antenna array transmission line structure.

$$Z_{in} = Z_1 \frac{Z_L + jZ_1 \tan \beta l}{Z_1 + jZ_L \tan \beta l} \quad (2.a)$$

$$Z_{in} = \frac{{Z_1}^2}{Z_L} \quad (2.b)$$

$$Z_1 = \sqrt{Z_0 Z_L} \quad (2.c)$$

In Equation (2.a), Z_{in} represents the input impedance observed at the matching section of the microstrip line when Z_1 denotes the characteristic impedance of the λ/4 long transmission line. Z_L represents target load impedance to be matched. At the design frequency impedance matching is achieved when the electrical length of the matching section is λ/4. In this equation $\beta l = (2\pi/\lambda)(\lambda/4) = \pi/2$. To simplify this equation we can divide the numerator and denominator by $\tan \beta l$ and take the limit as $\beta l \to \pi/2$ to get Equation (2.b). Considering the case of no reflection in the microstrip line ($\Gamma = 0$) the condition $Z_{in} = Z_0$ must be satisfied which yields the characteristic impedance Z_1 which is given in the Equation (2.c) [1]. The distance between each antenna element is adjusted to be 0.49 λ_0 horizontally and 0.33 λ_0 vertically to achieve maximum gain. Each antenna element is designed as a U-slot antenna and the whole

antenna array design operates at the center frequency of 2.61 GHz. The lower face of the FR4 material in Layer 1 is employed as a ground and the entire array is coaxially fed from a single point as shown in Figure 7.

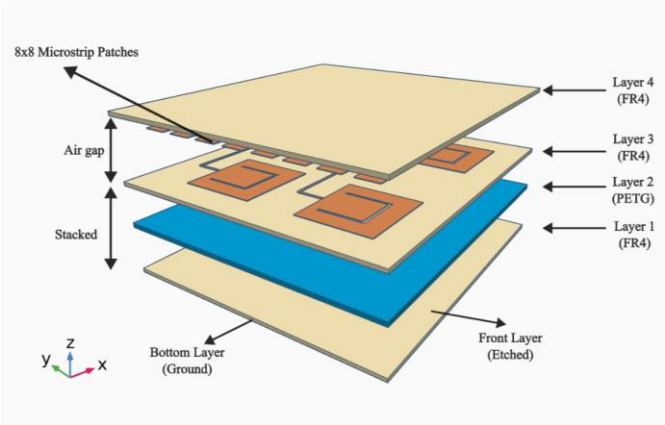


Figure 7. Exploded perspective view of 2x2 4-elements antenna array.

2.3 Parasitic array design and optimization

The parasitic layer in layer 4 is etched onto the bottom surface of an FR4 dielectric substrate, while the top surface of this dielectric substrate is completely etched. Square parasitic elements with a side of 10 mm (less than 0.1 λ_0) and periodicity of 5 mm (less than 0.1 λ_0) t are used while designing the parasitic layer. The parasitic square patch antenna array is initially designed to consist of 2x2 elements, then the design process is finalized to 8x8 elements in order to increase the gain of the antenna design. In this design process, from 2x2 elements to 8x8 elements, the distance of the parasitic layer to the antenna layer is optimized as h=5 mm, h=10 mm, h=15 mm and h=20 mm in order to obtain the highest gain. The flow diagram of the design process is given in Figure 8.

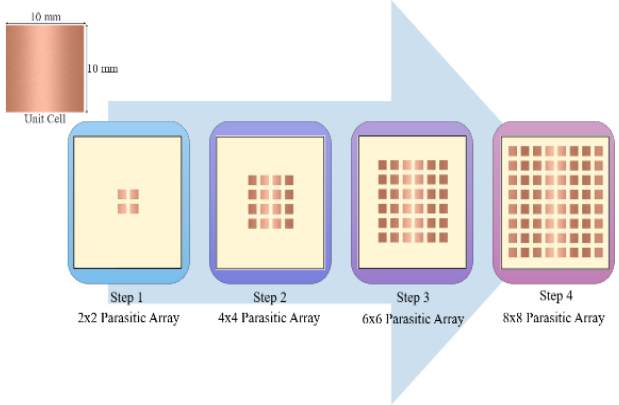


Figure 8. Parasitic layer evolution process.

The S_{11}, realized far field gain and 2D radiation pattern plots at the center frequency of each step are given in Figure 9.

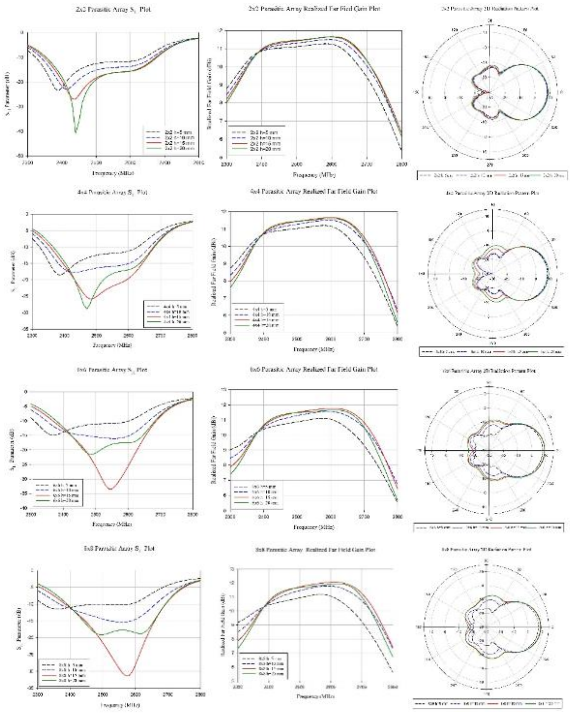


Figure 9. The S_{11}, realized far field gain and 2D radiation pattern plots at the center frequency of each design step.

When the graphs of each design stage given in Figure 9 are examined, it is observed that the center frequency and gain values change depending on the number of parasitic elements and the distance of the parasitic layer to the antenna layer. Considering each design step, it is seen that the highest gain is generally obtained when the distance from the parasitic layer to the antenna layer is h = 15 mm. In the final design, the 8x8 parasitic array design, this optimal height of 15 mm is optimized to obtain the highest gain again and the distance from the parasitic layer to the antenna layer is finally designed to be 18.4 mm. Figure 10 provides a detailed representation of the final parasitic layer design consisting of 8x8 square patch elements.

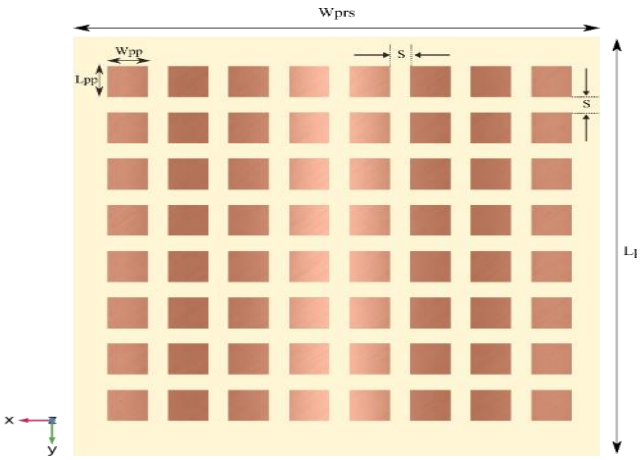


Figure 10. Top view of parasitic patch array. (W_{prs}=130.4 mm, L_{prs}= 136.04 mm, W_{pp}= 10 mm, L_{pp}=10 mm, S=5 mm).

3 Results and discussions

3.1 Simulated results

The design and simulation of the multilayer U-slot microstrip patch antenna array are performed by using Comsol 6.0 software with RF Module. Two illustrations of the antenna array structure are given in Figure 11.

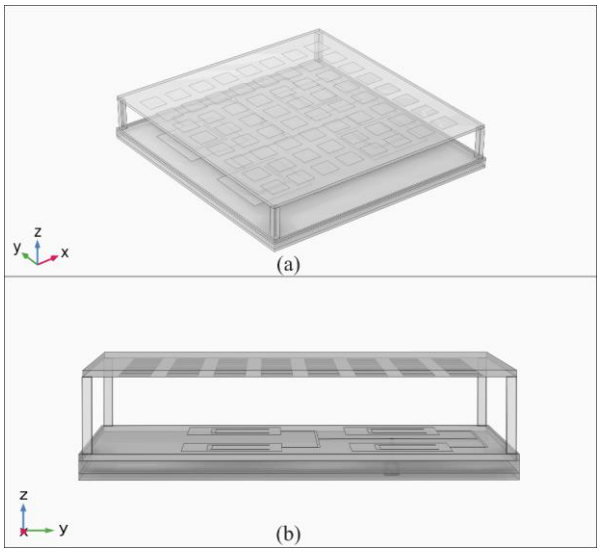


Figure 11. (a) Perspective and (b) side view of the proposed antenna array.

After the simulations, it is seen that the designed antenna has center frequency with the level of -22.75 dB at the 2610 MHz. Simulated reflection coefficient plot of the array is shown in Figure 12.

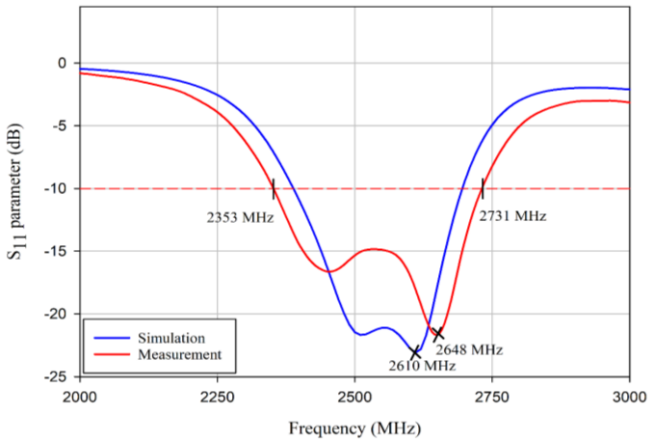


Figure 12. Simulated and measured S_{11} plot of the four elements array

The maximum gain of the 2x2 U-slot antenna array in the sandwich structure is measured as 12 dBi at the frequency of 2610 MHz. The designed antenna has a -10dB impedance bandwidth of %11.7 between 2390 MHz and 2690 MHz. The surface electric field distribution in the center frequency of the current design is given in Figure 13. The 2D and 3D radiation patterns of the designed antenna are given in Figure 15. The half power beamwidth is about 40° for both simulation and measured radiation patterns as shown in the same figure.

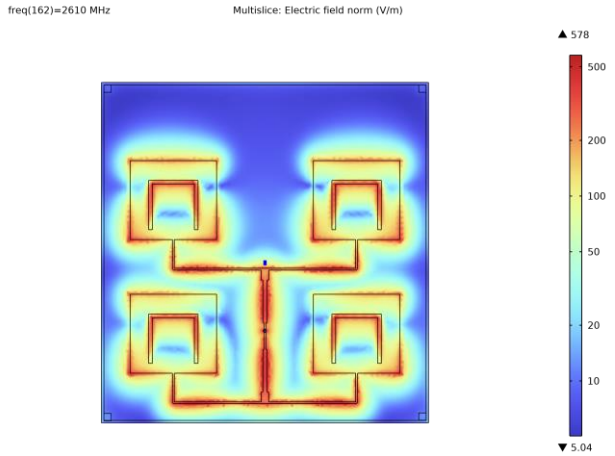


Figure 13. Surface electric field distrubition

3.2 Experimental results

A prototype of the proposed antenna design in this study is exhibited in Figure 14. In the manufactured antenna array, FR4 dielectric substrate material is used for the three layers. The dielectric substrate composed of PETG material in Layer 2 is fabricated using a 3D printer. FR4 material is used as the dielectric material to print the 2x2 U-slot antenna array and parasitic layer. The parasitic layer of the antenna array is isolated from Layer 3 by an air gap and supported with the help of rods made of PETG material.

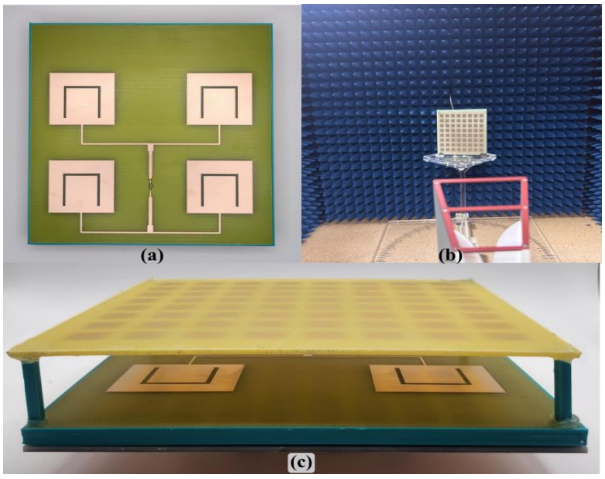


Figure 14. (a) Photographs of 2x2 antenna array layer, (b) radiation pattern measurement and (c) complete structure of proposed antenna

The reflection coefficient plot of the manufactured antenna array is measured by Rohde Schwarz ZNLE3 Vector Network Analyzer. The measured S_{11} plot compared with simulation results is given in Figure 12. When the plot of the measurement results given in Figure 12 is compared with that of the simulation results, it is observed that the measured

and simulated S_{11} plots are in a harmony. The -10 dB impedance bandwidth is obtained as %14.27 according to the measurement results. Since the achieved impedance bandwidth covers 2.4 GHz ISM band, the proposed antenna design is suitable for the ISM band applications. The comparison of the simulated and measured radiation patterns is given in Figure 15.

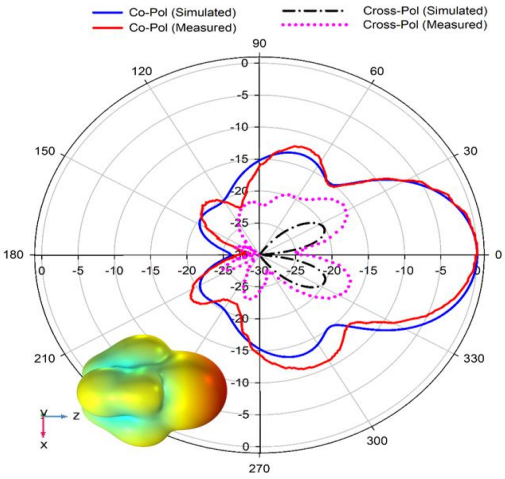


Figure 15. Simulated and measured co-polarization and cross-polarization radiation patterns of proposed antenna array in xz-plane

When the simulation and measurement results given in Figure 15 are evaluated, it is seen that results agree well. A maximum gain of 12 dBi is obtained with the simulated antenna array. Table II gives parameter comparisons of the proposed antenna with the multilayer antennas from the literature. The compared parameters in the table are electrical size, gain, impedance bandwidth, radiation efficiency and complexity.

It is clear from Table 2 that the designed and manufactured antenna in this study has the second smallest ground plane electrical size when it is compared with the given studies from the literature. Although the peak gain achieved in [33] is vaguely higher but it has bigger electrical ground plane size compared to our proposed antenna design. Similarly, while the antenna design in this paper exhibits lower gain compared to [34], it features a smaller ground plane electrical size and better radiation efficiency. The study reported in [35] has wider impedance bandwidth and smaller electrical size compared to proposed work but has lower gain. The antenna design having widest bandwidth in Table II is achieved in [36]. However, it has larger electrical ground plane size than that of the proposed antenna in this work also has the characteristics of lower antenna gain and radiation efficiency compared to this work. The antenna presented in [37] achieves a gain of 17.6 dBi which is better than that of our antenna design. Nevertheless, it has a narrower bandwidth and has larger ground plane dimensions in terms of the electrical sizes than the proposed design in this study also has a complex design.

4 Conclusion

In this study, a multi-layer, high-gain, 2x2 U-slot microstrip patch antenna array is designed, fabricated, and tested. The prototype measurements are in good agreement with the simulation results. Based on the measurement data, the proposed antenna has center frequency at 2.648 GHz. At 2.610 GHz, the array achieves a simulated maximum gain of 12 dBi and a radiation efficiency of 94.1%. The measured -10 dB impedance bandwidth is 14.27%, which covers the 2.4 GHz ISM band. This work demonstrates that the proposed antenna array offers high performance with a wide impedance bandwidth, making it suitable for various wireless communication applications. Potential improvements for future studies could involve altering the shape and number of the patch elements in the parasitic layer or adding extra layers to further optimize the antenna's performance. These modifications could result in an increased bandwidth, higher gain, and potentially enable multi-band operation, thereby broadening the antenna's potential applications.

Table 2. Performance comparison of the proposed antenna and the other antennas

Reference	Antenna Type	Size $\lambda_0 x \lambda_0 x \lambda_0$	Frequency (GHz)	Impedance Bandwidth	Gain (dBi)	Radiation Efficiency	Number of Layers	Complexity
33	2x2 Antenna Array	1.55 x1.55x0.11	5.85	%24.3 5.14 GHz- 6.56 GHz	12.5	NG	2	Moderate
34	2x2 Antenna Sub Array	1.4x1.4x0.161	12	%17.8	12.4	%85	3	Moderate
35	2x2 Antenna Array	0.98x0.98x0.047	2.45	%36.3	8.3 dBic	NG	2	Moderate
36	2x2 Antenna Array	1.374x1.374x0.078	5.35	%97.2 (2.75 GHz-7.95 GHz)	10.8	%88.5	2	Moderate
37	2x2 Antenna Array	6.68x6.68x0.837	20.02	%5.9 19.6 GHz-20.8 GHz	17.6	NG	3	Complex
This Work	2x2 Antenna Array	1.16x1.202x0.231	2.648	%14.27	12	%94.1	4	Moderate

* λ_0 is free space wavelength at the center frequency. **NG: Not Given.

Acknowledgement

This work is supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) under grant number 120E396

Conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

Similarity Rate (iThenticate): 16 %

References

[1] D.M. Pozar, Microwave engineering. John Wiley & Sons, 2011.

[2] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, Antenna theory and design. John Wiley & Sons, 2012.

[3] D. H. Schaubert, D. M. Pozar and A. Adrian. Effect of microstrip antenna substrate thickness and permittivity: comparison of theories with experiment, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 37, 6, 677-682, 1989. https://doi.org/10.1109/8.29353

[4] V.R. Gupta, N. Gupta, Two Compact Microstrip Patch Antennas for 2.4 GHz Band – A Comparison. Microwave Review, 12 (2), 29-31, 2006.

[5] H. R. Bae, S. O. So, C. S. Cho, J. W. Lee and J. Kim, A Crooked U-slot Dual-Band Antenna with Radial Stub Feeding. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 8, 1345-1348, 2009. https://doi.org/10.1109/LAWP.2009.2038937

[6] K. Wong, H. Chang, C. Wang and S. Wang, Very-Low-Profile Grounded Coplanar Waveguide-Fed Dual-Band WLAN Slot Antenna for On-Body Antenna Application. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 19 (1), 213-217, 2020, https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2958961

[7] J. J. Borchardt and T. C. Lapointe, U-slot Patch Antenna Principle and Design Methodology Using Characteristic Mode Analysis and Coupled Mode Theory. IEEE Access, 7, 109375-109385, 2019. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2933175

[8] C. Shekhar, An Optimized High Gain Microstrip Patch Array Antenna for Sensor Networks. International Conference on Communication, Networks and Computing, Springer, Singapore, 2018.

[9] C. Kumar, M. I. Pasha and D. Guha, Defected Ground Structure Integrated Microstrip Array Antenna for Improved Radiation Properties. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 16, 310-312, 2017. https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2574638

[10] B. Qian, X. Chen and A. A. Kishk, Decoupling of Microstrip Antennas with Defected Ground Structure Using the Common/Differential Mode Theory. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 20, 5, 828-832,2021. https://doi.org/10.1109/LAW P.2021.306 49 72

[11] F.Y. Zulkifli, E.T. Rahardjo and D. Hartanto, Radiation properties enhancement of triangular patch microstrip antenna array using hexagonal defected ground structure. Progress In Electromagnetics Research M, 5, 101-109,2008.https://doi.org/10.2528/PIERM0 81016 01

[12] M. Salehi, A. Tavakoli, A novel low mutual coupling microstrip antenna array design using defected ground structure, AEU-International Journal of Electronics and communications, 60 (10), 718-723, 2006. https://doi.org/10.1016/j.aeue.2005.12.009

[13] H. Alias, M. T. Ali, S. Subahir, N. Ya'acob and M. A. Sulaiman, Aperture coupled microstrip antenna array integrated with DGS and parasitic elements. 2013 IEEE Symposium on Wireless Technology & Applications (ISWTA),259-263,2013. https://doi.org/10.1109/ISWTA.2013.6688783

[14] R. -L. Xia, S. -W. Qu, S. Yang and Y. Chen, Wideband Wide-Scanning Phased Array with Connected Backed Cavities and Parasitic Striplines. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 66, 4, 1767-1775, 2018. https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2803131

[15] C. Arora, S.S. Pattnaik and R.N. Baral, SRR Superstrate for Gain and Bandwidth Enhancement of Microstrip Patch Antenna Array. Progress In Electromagnetics Research B, 76, 73-85, 2017. https://doi.org/10.2528/PIERB17041405

[16] M. Asaadi and A. Sebak, Gain and Bandwidth Enhancement of 2 × 2 Square Dense Dielectric Patch Antenna Array Using a Holey Superstrate. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 16, 1808-1811,2017. https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2679698

[17] A.R. Vaidya, R.K. Gupta, S.K Mishra and J. Mukherjee, High-gain low side lobe level Fabry Perot cavity antenna with feed patch array. Progress In Electromagnetics Research C, 28, 223-238, 2012. https://doi.org/10.2528/PIERC12031503

[18] S. Dalvi, S. Jagtap, V. Yadav and R. K. Gupta, High gain wideband 2×2 microstrip array antenna using RIS and Fabry Perot Cavity resonator. 2016 International Conference on Microelectronics, Computing and Communications (MicroCom),1-6, 2016. https://doi.org/10.1109/MicroCom.2016.7522547

[19] S. Shingate, N. Shukla and N. R. Ingale, Bandwidth and Gain Enhancement of Microstrip Array Antenna using Stacked Layer of Parasitic Patches. 2018 3rd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT), 32-36, 2018. https:/doi.org/10.1109/RTEICT42901.2018.9012634

[20] A. M. Mehta, S. B. Deosarkar, and A. B. Nandgaonkar, Design and Development of CPW-fed Miniaturized MSA for Improved Gain, Bandwidth and Efficiency Using PRS. Progress in Electromagnetics Research C, 137,211–222,2023. https://doi.org/10.2528/PIERC23 0 71403

[21] M.A. Ramkumar, C. Sudhendra and K. Rao, A novel low RCS microstrip antenna array using thin and wideband radar absorbing structure based on embedded passives resistors. Progress In Electromagnetics

Research C, 68, 153-161, 2016. https:doi.org/10.2528/PIERC16080506

[22] B. Rana and S. K. Parui, Nonresonant Microstrip Patch-Fed Dielectric Resonator Antenna Array. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 14, 747-750, 2015. https://doi.org/10.1109/LAWP.2014.2379624

[23] J. -H. Ou, J. Huang, J. Liu, J. Tang and X. Y. Zhang, High-Gain Circular Patch Antenna and Array with Introduction of Multiple Shorting Pins. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 68, 9, 6506-6515, 2020. https://doi.org/10.1109/TAP.2020.2983793

[24] D. Helena, A. Ramos, T. Varum, and J. N Matos, Antenna design using modern additive manufacturing technology: A review. IEEE Access, 8, 177064-177083, 2020. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3027383

[25] S.S. Carvalho, J. R. Reis, A. Mateus and R. F. Caldeirinha, Exploring design approaches for 3D printed antennas. IEEE Access, 12, 10718-10735, 2024. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3354372

[26] J. Sun and F. Hu, Three-dimensional printing technologies for terahertz applications: a review. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 30 (1), e21983, 2020. https://doi.org/10.1002/mmce.21983

[27] D. D. Patil, K. S. Subramanian and, N. C. Pradhan, 3-D-printed dual-band rectenna system for green IoT application. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 70 (8), 2864-2868, 2023. https://doi.org/10.1109/TCSII.2023.3248171

[28] F. Pizarro, R. Salazar, E. Rajo-Iglesias, M. Rodriguez, S. Fingerhuth, and G.Hermosilla, Parametric study of 3D additive printing parameters using conductive filaments on microwave topologies. IEEE Access, 7, 106814-106823, 2019. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932912

[29] M. A Belen, Stacked microstrip patch antenna design for ISM band applications with 3D-printing technology. Microwave and Optical Technology Letters, 61(3), 709-712, 2019. https://doi.org/10.1002/mop.31603

[30] G. Muntoni et al., A curved 3D-printed S-band patch antenna for plastic CubeSat. IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, 3, 1351-1363, 2022. https://doi.org/10.1109/OJAP.2022.3222454

[31] M. F Farooqui, and A. Kishk, 3-D-printed tunable circularly polarized microstrip patch antenna. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 18 (7), 1429-1432, 2019. https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2919255

[32] G. G. B. Oner, S. Basbug and Y. Altuncu, Multi-Layer I-Slot Microstrip Antenna for Internet of Things Applications. 2023 14th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, Turkiye, 2023, 1-4.https://doi.org/10.1109/ELECO60389.2023.10415969

[33] S. Jagtap, A. Chaudhari, N. Chaskar, S. Kharche and R. K. Gupta, A Wideband Microstrip Array Design Using RIS and PRS Layers. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 17 (3), 509-512, 2018. https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2799873

[34] F. Karami, P. Rezaei, A. Amn-e-Elahi, A. Abolfathi, and A. A. Kishk, Broadband and efficient patch array antenna fed by substrate integrated waveguide feed network for Ku-band satellite applications. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 31 (9), 2021. https://doi.org/10.1002/mmce.22772

[35] P. Le Bihan et al., Dual-Polarized Aperture-Coupled Patch Antennas with Application to Retrodirective and Monopulse Arrays. IEEE Access, 8, 7549-7557, 2020. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2961601

[36] L. Gu, W. Yang, W. Feng, Q. Xue, Q. Meng and W. Che, Low-Profile Ultrawideband Circularly Polarized Metasurface Antenna Array, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 19 (10), 1714-1718, 2020. https://doi.org/10.1109/LAWP.2020.3014436

[37] X. Liu and Z. Yan, Broadband RCS reduction for both microstrip array and Fabry-Perot antenna based on the quasi- AMC superstrate. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 31 (11), 2021. https://doi.org/10.1002/mmce.22838

[38] C. A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design. John Wiley and Sons, 2016.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 855-864

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Investigation of the effect of dip coating with silica reinforced epoxy composite on the mechanical properties of 3D printed PLA materials

3B baskılı PLA malzemelerin silika takviyeli epoksi kompozit ile daldırmalı kaplanmasının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi

İbrahim Aslan[1,*]

[1] *Amasya University, Taşova Yüksel Akın Vocational School, Department of Motor Vehicles and Transportation Technologies, 05800, Amasya, Türkiye*

Abstract

Coating parts with a composite improves mechanical strength, especially for low-strength materials. Ceramic reinforced polymer composites are one such coating, used in many industries to produce durable materials. In the study, composite materials were produced by coating the outer part of PLA parts produced with 10%, 15% and 20% fill densities with a 3D printer using additive manufacturing and material coating methods, with ceramic reinforced epoxy materials containing 15% silicon dioxide by weight. The impacts of the manufacturing parameters on tensile strength and hardness were investigated and SEM analyses were performed. The study concluded that the coated sample with an filler density of 20% demonstrated a maximum tensile strength of 22.34 MPa and a maximum hardness value of 74.7 Shore D. The SEM results showed the coatings were evenly deposited on the part's surface. The findings indicate that the coating of 3D-manufactured materials possesses considerable potential to produce high-performance materials.

Keywords: Composite materials, Dip coating, Mechanical properties, Silica

Öz

Bir malzemenin yüzeyine, mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla kompozit bir kaplama uygulanması işlemi özellikle düşük mekanik dayanımlı parçalar için önemlidir. Kaplama için kullanılan kompozitlerden birisi de seramik katkılı polimer kompozitlerdir. Birçok endüstride yaygın olarak kullanılan bu kompozitlerin, endüstriyel kaplama yönteminde kullanımıyla daha dayanımlı malzeme üretimi sağlanabilmektedir. Bu çalışmada, eklemeli imalat ve malzeme kaplama yöntemleri kullanarak 3B yazıcı ile %10, %15 ve %20 iç dolgu oranlarında üretilen PLA parçaların dış kısmı ağırlıkça %15 silisyum dioksit olan seramik takviyeli epoksi malzemeler ile kaplanarak kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretim parametrelerinin çekme dayanımına ve sertliğine etkisi araştırılarak SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda iç dolgu oranı %20 olan kaplamalı numunenin 22,34 MPa ile maksimum çekme dayanımına ve 74,7 Shore D ile maksimum sertlik değerine sahip olduğu bulunmuştur. SEM sonuçları ile kaplamaların parça yüzeyine homojen bir şekilde sağlandığı desteklenmiştir. Elde edilen sonuçlar, 3B üretilen malzemelerin kaplanması ile yüksek performanslı malzemeler üretme konusunda önemli bir potansiyele sahip olduğunu kanıtlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Kompozit malzemeler, Daldırmalı kaplama, Mekanik özellikler, Silika

1 Introduction

Additive manufacturing (AM) has caused a paradigm change in the manufacturing sector across a range of industries. This technological advancement has facilitated the fabrication of complex geometries with unparalleled customisation and a concomitant reduction in waste. AM has evolved from a rapid prototyping tool to a comprehensive manufacturing solution using a variety of materials [1].

AM technology offers superior design flexibility and reduces waste compared with conventional subtractive methods [2].

AM processes are characterised by the production of physical objects from digital information, with the fabrication occurring in a sequential manner, whether in a linear or layer-by-layer configuration. The scope of AM processes encompasses the direct fabrication of models, end-use components, prototypes, and assemblies, in conjunction with the production of fixtures, moulds and tooling for indirect fabrication [3].

It is apparent that the most prevalent 3D printing technology at present is unquestionably fusion deposition modelling (FDM), a technique pioneered by Stratasys in the late 1980s and regarded as one of the most extensively utilised AM technologies [1].

FDM is a widespread extrusion technique whereby a material is fed through a heated nozzle, melted, and deposited in layers. The nozzle is generally capable of movement in the horizontal direction, and the platform moves in the vertical direction following the deposition of each novel layer. Nevertheless, it should be noted that in

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ibrahim.aslan@amasya.edu.tr (İ. Aslan)
Geliş / Received: 20.03.2025 Kabul / Accepted: 17.04.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1661647

certain FDM technologies, the nozzle is capable of movement in both the horizontal and vertical axes [4].

The primary material utilised by FDM is thermoplastics, which possess a number of advantageous properties. These include the capacity to be readily heated and reshaped, thus rendering them suitable for a broad spectrum of applications. In the realm of FDM, polylactic acid (PLA) stands out as a noteworthy material due to its status as a biodegradable thermoplastic, a characteristic that renders it an environmentally friendly option [1].

Furthermore, the utilisation of PLA filament is predominant due to its cost-effectiveness, comparatively low melting point, and linear polymer chains [5].

It has been demonstrated that the parameters of the printing have a marked effect on the characteristics of the components. This has the result that the quality and processing time are enhanced. The parameters of the FDM process can be classified into several variables, including those relating to slicing parameters, build direction, layer thickness, air gap, flow rate, deposition rate and raster angle [6].

In their natural state, polymeric materials demonstrate certain deficiencies, including inadequate strengths and rigidity, and low operating temperatures, factors that collectively impose considerable constraints on their utilisation. Consequently, numerous researchers have incorporated filler additions, which have been demonstrated to enhance the mechanical characteristics of the polymer and yield superior outcomes. The primary objective of polymer filler was to decrease the cost of the material by incorporating a lower-cost filler. Silica dioxide, abbreviated as SiO_2, is a filler addition that has been employed in a multitude of experiments. Silica, in general, has the capacity to blend with a variety of polymeric materials, thereby enhancing the final properties and qualities of the resulting composite. Furthermore, the utilisation of silica as a filler has been a subject of extensive study, with a view to enhancing the mechanical behaviour of polymeric materials. As demonstrated in extant literature, the incorporation of silica as a reinforcement agent has been demonstrated to enhance the characteristics of polymer composites, including tensile strength and elastic modulus [7].

A composite material can be defined as an intelligent combination of two or more component parts that are mixed and insoluble in each other at the macroscopic level. The reinforcement can take various forms, including particles, fibres, flakes or particles. A key research area in composite materials is the development of strong, lightweight structural composites. The utilisation of these materials is pivotal in complex structures, including those employed in the automotive sector, the aerospace industry, and the fabrication of substantial wind turbine blade structures [8].

Polymers are popular in engineering because they are cost-effective and environmentally friendly [9].

Polymer matrix composite (PMC) is a composite of a polymer matrix and a filler material. The properties of PMCs are known to be contingent on the characteristics of the filler material and matrix, the interface and dispersion of said filler material in the polymer matrix, as well as the configuration and orientation of said filler material within said polymer matrix [10].

From a production perspective, the fabrication of PMC materials is more expeditious than that of carbon matrix, ceramic matrix, or metal matrix composites. Thermoplastic polymers are extensively utilised due to their advanced mechanical properties, exceptional resistance to chemical reactions, and reduced cost compared to metal matrix composites [11].

Epoxy is a polymer that is utilised extensively because of its simplicity of processing, high adhesion and high chemical resistance. Epoxy-based composites are frequently employed in aerospace, automotive and marine applications. Epoxy has been extensively utilised in the domain of composite applications as a polymer matrix. Epoxy resin is widely regarded as the most significant polymer. Epoxy is often used in composites due to its high strength, stability and electrical properties [12].

Epoxy-based polymer composites have been identified as a significant category of material due to their utilisation in multiple sectors as a substitute for conventional materials. Various fillers are used to enhance and modify the strength of composite materials. In numerous instances, the significance of a material's mechanical properties is regarded as paramount, superseding other attributes [13].

The addition of particulate fillers to composites is known to have a beneficial effect on their mechanical strength. The incorporation of fillers has been demonstrated to enhance a range of properties, including mechanical strength, thermal conductivity and thermal stability. Consequently, there is a preference for the utilisation of polymer composites over pure polymers in a variety of applications. A plethora of inexpensive inorganic particulate materials, including mica, calcium carbonate, kaolin clay, carbon nanotubes, titania and silica, are frequently employed as fillers to augment the thermal and mechanical characteristics of polymers. Silica is of particular interest as a filler due to its stability and non-reactivity. This has led to its extensive use in numerous applications to provide improved properties in composites [14].

A plethora of studies have been conducted on SiO_2 reinforced epoxy matrix composite materials, as evidenced by the extensive body of literature on the subject.

Jang et al. investigated the in-situ effective material characteristics of micron-sized silicon dioxide particles in SiO_2 particle-reinforced polymer composite materials. Following the integration of the particulate matter, the cure agent was introduced and dispersed. The effect of loading fraction of silicon dioxide particles was investigated by making seven composite specimens at varying particle loadings (volume fractions ranging from 5% to 35%). The effective modulus of elasticity and coefficient of thermal expansion of micron-sized SiO_2 particulate matter demonstrate that the in-situ particulate characteristics are significantly divergent from the respective characteristics of bulk or film-form materials [15].

Poh et al. explored the tensile and thermal characteristics of epoxy composites that had been impregnated with mica, calcium carbonate, and silica. These minerals were utilised

as fillers in the manufacture of epoxy thin film composites intended for use in capacitors. The outcomes of the study evidenced that the tensile properties of epoxy thin films with 20% filler loading by volume exhibited a decrease as the filler loading increased, a phenomenon attributed to the onset of brittleness [16].

Jo and Lee examined the mechanical characteristics of epoxy composites reinforced with micrometre-sized silica particles using experimental and empirical modelling. For all samples utilised in the study (ranging from the base to the sample content 70 wt% silica filler), the tensile strength and elastic modulus exhibited a gradual increase of 8-10% and 51-55%, accordingly, in comparison to the base specimens. However, the ductility of the specimen diminished by 34% [17].

AbdulRazaq et al. explored the characterisation of the mechanical behaviours of epoxy-silica functionally graded materials. The fabrication of the functionally graded material was undertaken utilising the method of hand lay-up. The material consists of silicon dioxide reinforced epoxy resin with a particle size of 100 µm with weight percentages ranging from 0% to 80%. The experimental findings demonstrated that augmenting the proportion of silicon dioxide enhances the mechanical characteristics, with the increase in the elastic modulus being in direct proportion to the weight percentage of the reinforcing material. The modulus exhibited an almost linear increase as the level of added silica particles increased [18].

Bharadwaja et al. investigated the tensile and flexural behaviour of epoxy and SiO_2 composites. The flexural strength of the composite (Epoxy + SiO_2) exhibited an increasing trend with an increase in SiO_2 content up to 4% by volume, followed by a decrease of 5% [19].

Abd et al. carried out a comparative exploration into the mechanical characteristics of silica epoxy composites, examining the impact of micro (100 µm) and nano (12 nm) silica particles on the mechanical characteristics of the epoxy resin. The preparation of micro and nano composites was undertaken through a three-step process, incorporating varying volume fractions of micro and nano particles (from 1 to 20 vol%). The study's outcomes indicated that the composites presented enhanced mechanical properties relative to those of pure epoxy resin [20].

3D printed products have many applications and are subject to various environmental factors. In conditions of high humidity and ultraviolet radiation, there is a greater need for protective coatings that also enhance the appeal of 3D-printed objects. The establishment of an effective surface system, encompassing polymer surfaces and coatings, necessitates a comprehensive comprehension of surface properties, with a particular emphasis on surface wettability. These properties are inherently associated with the adhesion of coatings to substrates. The surface properties of polymers are such that surface treatment is only possible with suitable coatings. Furthermore, the application of coatings to 3D printed models is possible through myriad technologies, contingent on the coating composition and characteristics, the object's geometry, and its dimensions [21].

A substantial number of studies have been performed in the extant literature investigating the surface and mechanical properties of components through the process of coating with epoxy, as well as investigating the surface properties of components through the process of coating with silica-filled epoxy matrix composite material.

Teh et al. investigated the characteristics of epoxy resin-coated silica-filled composite materials. The successful preparation of novel epoxy resin-coated silica filler composites was achieved through the utilisation of a mechanical mixing method. The efficacy of this technique was demonstrated by its superiority to conventional mixing techniques in the production of composites with high filler loading [22].

Lee et al. fabricated a superhydrophobic surface using a filament (PLA) 3D printer and immersion coating with silica nanoparticles. An investigation into the wettability of the 3D-printed component was conducted using a method that involved the measurement of both static contact angles and sliding angles. These measurements were taken prior to and following the dip-coating procedure. The process was found to be readily implementable with commercially available FDM 3D printers and has potential applications in fluid position control and reduced water adhesion [23].

Yang et al. focused on the fabrication of hydrophobic surfaces on PLA by FDM. In the study, the focus was on the employment of FDM 3D printing technique in the preparation of hydrophobic coatings on PLA parts, with a particular emphasis on its design and processing flexibility. Moreover, the investigation explored how the parameters employed in printing processes influenced the subsequent surface roughness and wettability of the test pieces [24].

Tu et al. carried out the deposition of SiO_2/epoxy composite coatings on the epoxy resin surface using a spraying technique. The objective of the study was to elucidate the influence of surface coating on the properties of surface charge deposition in epoxy resin. The investigation into the charge deposition on the surface was conducted utilising the electrostatic probe technique. The study found that micron SiO_2 particles (1-3 wt%) or nano SiO_2 particles (3 wt%) can effectively suppress the surface charge of epoxy resin [25].

Hiremath et al. investigated the effect of epoxy coated 3D printed polymers on the mechanical behaviour of materials. The investigation involved the utilisation of polymers like PLA filaments in the fabrication of 3D-printed components with different thicknesses of layers. The mechanical behaviour of the samples that underwent printing and epoxy resin coating were subjected to rigorous analysis [26].

The objective of the present study is to investigate the manufacturing of composite materials through the coating of silicon dioxide-reinforced epoxy material on the exterior surfaces of PLA components manufactured via the FDM method. The current study investigates the influence of production parameters on the mechanical characteristics of these composite materials. The utilisation of AM and material coating methods in the production of composites is a key advantage of the present study. The mechanical strength of the composites manufactured was assessed by

conducting tensile and hardness tests. It is thought that the production of parts with increased mechanical strength by coating the outer part of PLA materials, which can be produced quickly at low filling rates, with silica reinforced epoxy composite material will be industrially beneficial, especially the production of parts such as mounting brackets, which are important in the automotive sector, can be provided by this method. It is hypothesised that the analysis of the impact of the production parameters employed in this study on the mechanical properties will significantly contribute to the existing body of literature.

2 Material and method

In this study, 3D parts with 10%-15% and 20% internal filling ratios in gyroid filling pattern were produced by utilising the Creality CR-M4 3D Printer. The production process was executed through the implementation of the FDM printing method, employing PLA material. The material has achieved a notable level of popularity within the domain of 3D printing, primarily due to its environmental sustainability and cost-effectiveness. In this investigation, the Porima brand was utilised in grey, with a diameter of 1.75 mm. The FDM printing parameters comprised a thickness of layer of 0.2 mm, a printing temperature of 220 °C and a printing table temperature of 65 °C. The printing speed was set at 60 mm/s, and a wall thickness of 1.2 mm was employed. The properties of the PLA are outlined in Table 1.

Table 1. PLA mechanical properties [27]

Mechanical properties	Values
Tensile Strength	15.5 MPa-72.2 MPa
Young's Modulus	2.020 GPa-3.550 GPa
Elongation at Break	0.5%-9.2%
Flexural Strength	52 MPa-115.1 MPa

In the domain of AM of three-dimensional objects, the initial step entails the conception of the desired three-dimensional shape utilising CAD (computer-aided design) software. Subsequently, the geometry undergoes conversion to the stl (standard tessellation language) format and is then sliced into layers by the Cura slicing software. The three distinct fill densities employed as printing parameters in this study are defined within the 3D printer software. During the printing process, each layer is printed successively, resulting in the production of the 3D component in accordance with ASTM standards.

In the current study, epoxy resin was utilised as the matrix, with SiO_2 particles serving as the filler material. Silicon dioxide is a cost-effective material that is readily available in nature and can be easily transported. The silicon dioxide was obtained from a local company, and its mean particle size was determined to be 44 µm. Epoxy resins are utilised extensively in a broad range of industrial sectors, owing to their remarkable mechanical and chemical properties. The weight ratio of the epoxy and hardener mixture utilised in this study is 2:1 (epoxy: hardener), both of which were procured from a local supplier.

In this study, 15 wt% silicon dioxide was added to the epoxy matrix with the objective of producing silicon dioxide-reinforced epoxy polymer materials for coating. In order to obtain the required homogeneity in the structure of SiO_2 reinforced epoxy polymers, the matrix and filler materials were subjected to a mechanical agitation process in a mixer operating at a speed of 3000 rpm for a duration of 45 minutes.

Jiang et al. revealed that an increase in dispersion time resulted in a more homogeneous dispersion; however, an excessively prolonged dispersion could not further enhance the dispersion effect [28].

To reduce production time and enhance the mechanical behaviours of the FDM parts, SiO_2 reinforced epoxy polymer material was used to coat the 3D part using the dip coating process. The process involved dipping and removing using a router table to ensure a homogeneous and consistent coating of the SiO_2 reinforced epoxy polymer blend on the exterior of the 3D printed part, and the immersion time was set to 5 s. The coating thickness of the samples was measured to be 250 µm (±25 µm) with a micrometer. Thickness measurements were taken from different parts of the samples and repeatedly. Figure 1 shows the methodology used to inject the SiO_2 reinforced epoxy polymer into 3D components produced by the FDM technique. Following the coating process, the specimens were subjected to 72 hrs curing period at ambient temperature.

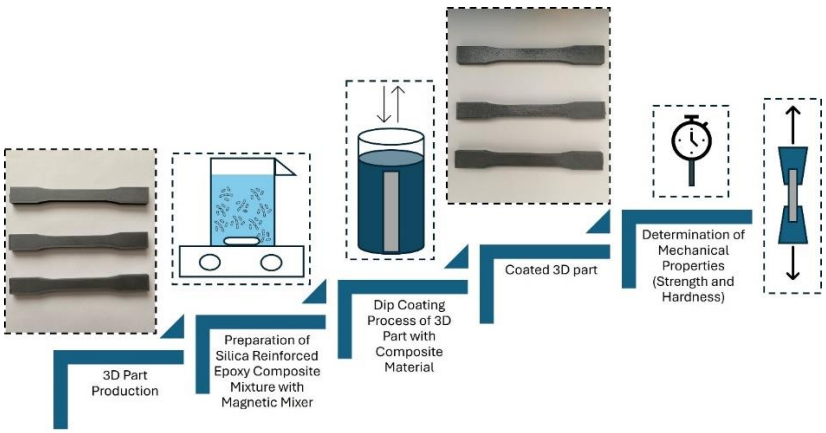


Figure 1. Production methodology

The coating material fills the surface voids by penetrating into the micropores and rough areas of the PLA surface and then hardens to form a mechanical interlocking effect. The silica particles increase the spreadability and adhesion strength of the coating to the surface, ensuring a strong bonding of the coating to the PLA surface.

The tensile testing specimens were manufactured in accordance with the provisions stipulated in ASTM D638-I, with dimensions of 165 mm in length, 19 mm in width, and 7 mm in thickness. The experimental procedure involved conducting the tensile tests at ambient temperature using a Shimadzu universal testing machine. The samples were exposed to a constant feed rate of 3 mm/min, and the resulting maximum tensile strengths were determined. Three samples were produced for each type of tensile test specimen, and the results were averaged. Figure 2 illustrates the appearance of the coated 3D parts during the tensile test.

Figure 2. Coated 3D part during tensile test

In accordance with the prevailing ASTM D2240 standard, a hardness (Shore D) test was also conducted on the specimens. The image of the coated 3D parts during the hardness test is shown in Figure 3. Each hardness value was subjected to five repetitions and then averaged.

Figure 3. Coated 3D part during Shore D hardness test

The nomenclature employed for the specimens produced in this study incorporates a systematic classification system based on the silica content and filler density. In this classification system, the ratio following the letter I denotes the filler density, with the subsequent letter indicating whether the specimen is non-coated (N) or coated (C). The graphs are accompanied by error bars, which are indicated by a line.

As illustrated in Figure 4, the coating surfaces of the 3D parts were analysed utilising a Scanning Electron Microscope (SEM). The analysis demonstrated that the silica particles were distributed uniformly throughout the epoxy.

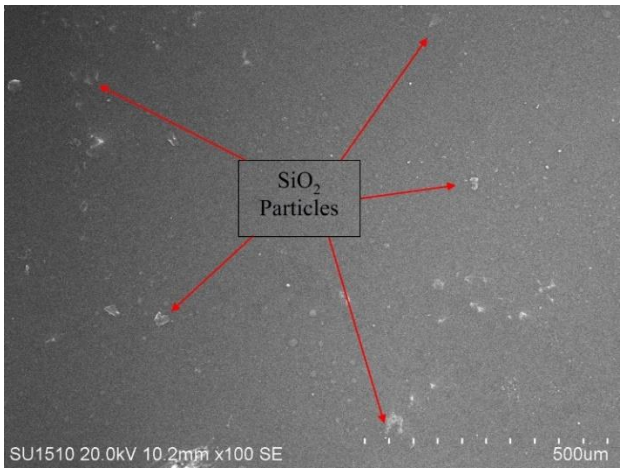


Figure 4. SEM image of sample I10C

3 Results and discussion

The force-displacement graphs, maximum tensile strengths and elastic modulus of 3D-printed PLA specimens manufactured with varying uncoated filler densities and 3D-printed PLA specimens coated with micro silica-reinforced epoxy are demonstrated in Figure 5, Figure 6 and Figure 7, respectively.

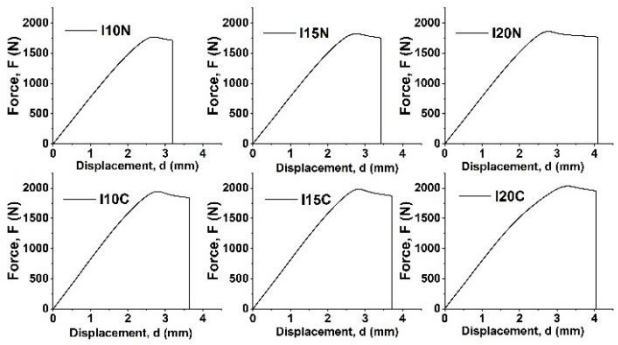


Figure 5. The force-displacement graphs

The study revealed that the maximum tensile force was attained by the coated specimen with a filling ratio of 20%, while the minimum tensile force was obtained by the uncoated specimen with a filling ratio of 10%.

The study's findings indicate that the filler density exerts a notable influence on the tensile strength values of 3D-

printed PLA samples. The enhancement in filler density resulted in a considerable increase in the tensile strength values of the 3D-printed PLA components.

Filler density has been shown to be directly proportional to strength. It has been observed that specimens with higher filler density exhibit enhanced interlayer bonding and increased resistance to deformation, attributable to reduced air voids. Increasing the filler density has been found to increase the mechanical strength of the part due to the interlayer bonding between successive layers. A lower filler density has been demonstrated to increase the production speed and reduce the amount of material required [29].

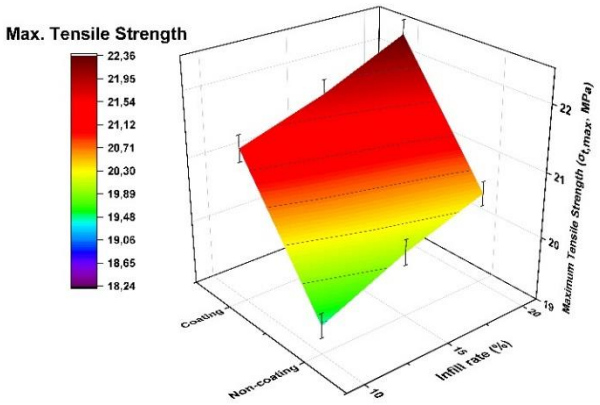


Figure 6. Maximum tensile strength

Maguluri et al. examined the impact of FDM processing parameters on the mechanical behaviours of PLA components, utilising the Taguchi method. The investigation encompassed the analysis of the effect that filler density, printing speed, and nozzle temperature have on the tensile strength of specimens fabricated using PLA filament. The findings revealed that an augmentation in filler density, ranging from 50% to 100%, resulted in a substantial enhancement in elastic modulus, tensile strength, and breaking stress, respectively [30].

In the uncoated specimens with varying filler densities, the specimen with a 20% filler density was found to demonstrate the highest tensile strength, with a recorded value of 20.43 MPa. Similarly, among the specimens coated with different filler densities, the specimen with a 20% filler density demonstrated the highest tensile strength, with a recorded value of 22.34 MPa.

The results also demonstrate the variation in tensile strength of uncoated and coated PLA samples at the same filler density. A comparison of the uncoated and coated samples at a 10% filler density reveals that the tensile strength increased by 9.93% when the sample was coated. A similar trend was observed when uncoated specimens with 15% and 20% filler density were compared with coated specimens with the same filler density, exhibiting an increase in tensile strength of 8.84% and 9.34%, respectively. The coated specimen with 20% filler density demonstrated the highest tensile strength of 22.34 MPa among all specimens.

As demonstrated in the existing literature, the modulus of elasticity and tensile strength values of PLA samples are susceptible to variation in accordance with the parameters employed during the printing process.

Seol et al. explored the parameters of filler density printing with respect to the mechanical behaviours of 3D-printed PLA components. The PLA sample's mean tensile strength was determined to be 17.772 MPa at 25% filler density, rising to 21.052 MPa at 50% and 28.723 MPa at 75%, peaking at 50.073 MPa at 100%. These findings indicated that the tensile strength of the PLA sample produced by 3D printing technology exhibited an increase with increasing filler density. Furthermore, the tensile elongation of the PLA sample at the fracture point according to the filler density was determined to be 5.59%, 6.36%, 7.35% and 5.7% at 25%, 50%, 75% and 100% density, respectively. Furthermore, an increase in infill density resulted in a corresponding rise in elastic modulus, from 367 MPa to 400 MPa, 473 MPa, and ultimately to 969 MPa [31].

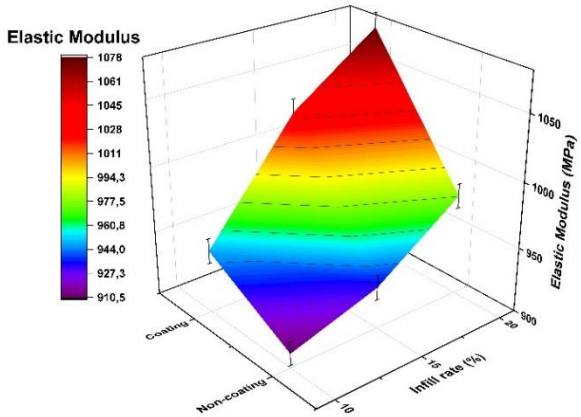


Figure 7. Elastic modulus

Chaćon et al. explored the impact of process parameters on the mechanical characteristics of PLA structures manufactured using FDM. The layering involved in the 3D printing process gives rise to anisotropic behaviour in the samples. As demonstrated in the study, the mechanical behaviours of components manufactured using disparate printing parameters manifested as maximum tensile strengths of 89.1 MPa and minimum tensile strengths of 20.2 MPa [27].

Pandzic et al. examined the impact of filler type and density on the tensile characteristics of PLA material in the FDM method. For the gyroid filler pattern, an increase in filler density from 10% to 90% resulted in enhanced ultimate tensile strength (UTS) for 50% and yield strength for 64%. At a filler density of 10%, the tensile strength of the part was 18.4 MPa, and at a filler density of 20%, it was 18.1 MPa. It was observed that all filler patterns exhibited maximum UTS and yield strength for 90% of the filler. The findings further demonstrate that the UTS of the PLA material with 100% filler is 42.15 MPa, and its yield strength is 36.40 MPa. A comparison of the UTS and yield strength of all filler patterns

with 90% filler and 100% filler reveals a discrepancy of approximately 40% [32].

In this study, the tensile strength of the coated PLA specimen produced at 20% filler density was determined to be lower than that of the PLA samples produced at 100% filler density, as reported in the existing literature. However, the tensile strength of the coated sample was higher than that of the PLA samples produced at the same filler density.

The results obtained demonstrate that the density of the infill exerts an impact on the modulus of elasticity values of 3D-printed PLA samples. It is evident that an augmentation in filler density results in enhancement of the elasticity modulus values of the 3D-printed PLA samples. Among the uncoated samples with varying filler densities, the specimen with a 20% filler density exhibited the highest modulus of elasticity, measuring 977.74 MPa. In the case of the coated specimens, the specimen with 20% filler density was determined to have the highest modulus of elasticity, measuring 1077.74 MPa.

The results also demonstrate the change in modulus of elasticity of uncoated and coated PLA samples at the same filler density. A comparison of the uncoated and coated samples at a 10% filler density reveals that the modulus of elasticity increases by 4.11% when the sample is coated. A similar trend was observed when the modulus of elasticity of uncoated and coated specimens with 15% and 20% filler densities was compared; the modulus of elasticity increased by 10.65% and 10.22%, respectively, when the specimen was coated. The highest modulus of elasticity (1077.74 MPa) was observed in the coated specimen with 20% filler density.

It is widely acknowledged within the relevant research community that the filler percentage is one of the most substantial parameters impacting the mechanical characteristics of the component. The results of the study indicate a clear correlation between an increase in filler percentage and an improvement in mechanical characteristics [6].

Abeykoon et al. researched the optimisation of FDM parameters for the purpose of enhancing PLA 3D-printed structures. For pure PLA, parts with 100% filler density achieved the highest modulus of elasticity of 1538.05 MPa. As is apparent from the findings, the modulus of elasticity of the sample exhibiting 100% filler density (1538.05 MPa) stands at about double the level of that observed in the specimen with 25% filler density (861.78 MPa). It has been documented that a reduction in filler density can result in an augmentation of voids within the structure, thereby precipitating a diminution in part strength. Filler density increases enhance mechanical bonding by decreasing porosity. Parts fabricated with a filler density of 100% exhibited the highest modulus of elasticity, and the strength of the printed parts decreased as the filler density decreased [33].

Tymrak et al. investigated the mechanical characteristics of parts manufactured utilising 3D printers under realistic environmental conditions. The results demonstrated that the mean tensile strength for PLA was 56.6 MPa, and the average elastic modulus for PLA was 3368 MPa [34].

In the current study, the elastic modulus of the coated PLA sample produced at 20% filler density was determined to be lower than that of the PLA samples produced at 100% filler density, as reported in the relevant literature. However, the modulus of elasticity was higher than the PLA samples produced at similar printing parameters such as the same filler density.

As illustrated in Figure 8, the fractured test specimens are presented for examination. The coated specimen with the highest filler density exhibited greater contact resistance against higher loads in comparison to the other samples.

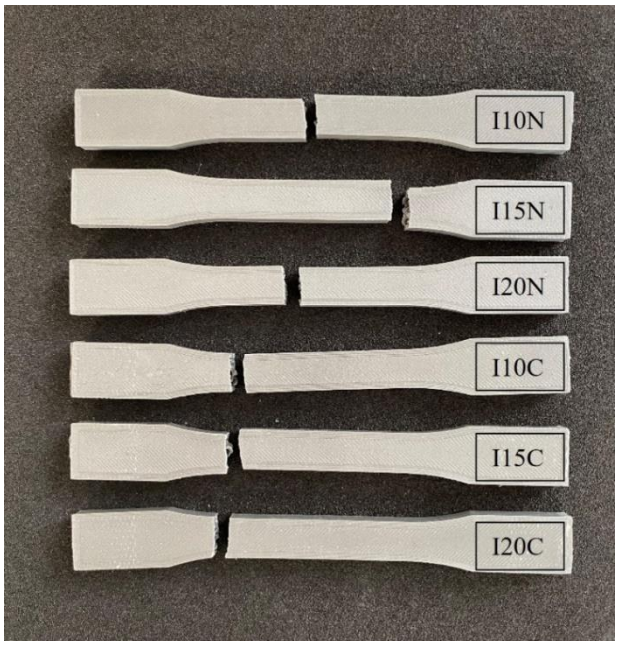


Figure 8. Fractured test specimens

The maximum hardness values attained as a consequence of the hardness (Shore D) test of uncoated 3D printed PLA samples produced at different filler densities and 3D printed PLA samples coated with micro silica reinforced epoxy are given in Figure 9.

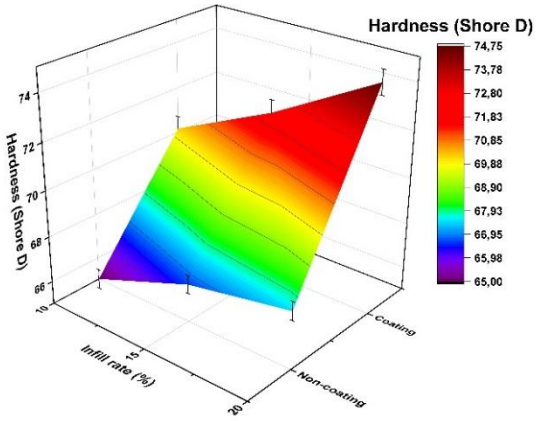


Figure 9. Hardness (Shore D) results

The findings indicate that the filler density has an effect on the hardness values of 3D-printed PLA samples. It is demonstrable that an increase in filler density results in a concurrent increase in the hardness values of the 3D-printed PLA specimens.

In the uncoated specimens, the maximum hardness value recorded was 67.5 Shore D, as observed in the specimen with a 20% filler density. Among the coated specimens, the highest recorded hardness value was found to be 74.7 Shore D, and this was observed in the sample with a 20% filler density.

The findings of the study demonstrate the variation in hardness values of uncoated and coated PLA specimens at a constant filler density. A comparison of uncoated and coated specimens at a 10% filler density reveals that the hardness value increases by 7.84% in the coated sample. A similar trend was observed when the uncoated samples with 15% and 20% filler density were compared with their coated counterparts, with an increase in hardness values of 8.4% and 10.66%, respectively. The coated specimen with a 20% filler density exhibited the highest hardness value of 74.7 Shore D among all the specimens. The coated specimen with the highest filler density exhibited higher hardness resistance in comparison to the other samples.

As demonstrated in the existing literature, an increase in filler density has been observed to correspond with an increase in hardness value. Furthermore, it has been ascertained that the hardness (Shore D) values of PLA specimens are subject to variation in accordance with divergent printing parameters.

An association has been identified between an increase in percentage filler density and a rise in Shore hardness values. This occurrence can be ascribed to the phenomenon of complete bond fusion of the material at the raster interface. Conversely, a decrease in the percentage of filler density ratio was determined to be associated with a decrease in Shore hardness values. The phenomenon under investigation may be attributed to the incomplete formation of bond fusion within the material at the interfaces [35].

Taha et al. conducted a study on the mechanical characteristics and build time of PLA 3D printed parts with linear patterns, differing thickness of the layer, build orientations and filler percentages. The hardness at different layer thicknesses (0.15-0.3-0.4 mm) at 10% filler density was in the range of 36.92-45.25 shore D, 32.79-48.24 shore D at 30% filler density, and 36.52-51.12 shore D at 50% filler density [36].

Hamoud et al. examined the effect of diverse filler patterns and print orientations on the mechanical characteristics and print time of PLA utilising FDM. The hardness measurements were recorded for various filler patterns and build orientations, including diagonal, triangular, and 3D diagonal filling patterns, as well as flat orientations. The findings indicated that the hardness measurements ranged from 45.8 to 46.5 at a 25% filling rate, from 45.8 to 47 at a 50% filling density, and from 46 to 47.1 shore D at a 75% filling density [37].

Maguluri et al. researched the affect of printing parameters on the hardness of 3D-printed PLA parts. To do this, they used the DOE approach. The study established that the hardness (Shore D) of the 3D-printed PLA parts varied markedly with different printing parameters, including varying speeds, nozzle temperatures, and filler densities. The Shore D hardness values ranged from 75.58 to 80.27 at 50% filler density, from 78.34 to 83.46 at 75% filler density, and from 79.27 to 84.34 at 100% filler density [38].

Dakhil et al. undertook research into the influence of filling pattern and filling ratio on the compressive strength and hardness of 3D-printed PLA polymers. The Type D Shore Durometer hardness results generally ranged from 67 to 85, with an average hardness value of 81.37 Shore D [39].

In the study undertaken by Hanon et al., the influence of three-dimensional printing parameters on the mechanical characteristics of PLA polymer was investigated, with a particular focus on the correlation between these parameters and the resulting hardness. The investigation revealed that samples produced at 100% filler density exhibited hardness values ranging from 78 to 81 Shore D [40].

In the present study, the Shore D hardness value of the uncoated PLA sample produced at 20% filler density was determined to be lower than the PLA samples produced at 100% filler density in the studies referenced in the literature. However, the hardness (Shore D) values were higher than the PLA specimens produced at similar printing parameters, such as the same filler density. Furthermore, the hardness (Shore D) values of the coated PLA specimens were higher than those of the PLA samples produced under similar conditions documented in the extant literature. This can be ascribed to the formation of a harder layer on the surface of the PLA samples by the micro silica-reinforced epoxy coating, thus increasing the Shore D hardness.

This method facilitates the fabrication of more strength and hard parts and components with high wear resistance, particularly in the automotive industry. Moreover, in the aerospace industry, the utilisation of lightweight yet robust materials confers distinct advantages for components that are critical in supporting structural loads.

4 Conclusion

The findings derived from the investigation into the impact of incorporating micro silica-reinforced epoxy into the 3D-printed PLA materials during the dip coating process on the mechanical properties are presented in below.

- The enhancement of filler density resulted in a substantial augmentation in tensile strength and elasticity modulus values of the 3D-printed PLA components.
- Among the uncoated specimens with different filler densities, it was determined that the specimen with 20% filler density had the highest tensile strength among the uncoated specimens with 20.43 MPa.
- The coated specimen with a 20% filler density was determined to have the highest tensile strength of 22.34 MPa and the highest elasticity modulus value of 1077.74 MPa among all specimens.
- The investigation revealed that the coated sample with a 20% filler density exhibited the highest hardness value of 74.7 Shore D among all the samples examined.

Conflict of interest

The author declares that there are no conflicts of interest.

Similarity rate (iThenticate): %18

References

[1] L. Zhou, J. Miller, J. Vezza, M. Mayster, M. Raffay, Q. Justice, Z. Al Tamimi, G. Hansotte, L. D. Sunkara, J. Bernat, Additive manufacturing: A comprehensive review. Sensors, 24, 2668, 2024. http://doi.org/10.3390/s24092668.

[2] J. Fang, Z. Wang, W. Liu, S. Lauria, N. Zeng, C. Prieto, F. Sikström, X. Liu, A new particle swarm optimization algorithm for outlier detection: Industrial data clustering in wire arc additive manufacturing. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 21, 1244-1257, 2024. http://doi.org/10.1109/TASE.2022.3230080.

[3] M. K. Thompson, G. Moroni, T. Vaneker, G. Fadel, R. I. Campbell, I. Gibson, A. Bernard, J. Schulz, P. Graf, B. Ahuja, F. Martina, Design for additive manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. CIRP Annals, 65, 737-760, 2016. http://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004.

[4] V. Tagliaferri, F. Trovalusci, S. Guarino, S. Venettacci, Environmental and economic analysis of FDM, SLS and MJF additive manufacturing technologies. Materials, 12, 4161, 2019. http://doi.org/10.3390/ma12244161.

[5] C. H. Lee, F. N. B. M. Padzil, S. H. Lee, Z. M. A. Ainun, L. C. Abdullah, Potential for natural fiber reinforcement in PLA polymer filaments for fused deposition modeling (FDM) additive manufacturing: A review. Polymers, 13, 1407, 2021. http://doi.org/10.3390/polym13091407.

[6] M. Algarni and S. Ghazali, Comparative study of the sensitivity of PLA, ABS, PEEK, and PETG's mechanical properties to FDM printing process parameters. Crystals, 11, 995, 2021. http://doi.org/10.3390/cryst11080995.

[7] N. Al-Mazrouei, A. Ismail, W. Ahmed, A. H. Al-Marzouqi, ABS/Silicon dioxide micro particulate composite from 3D printing polymeric waste. Polymers, 14, 509, 2022. http://doi.org/10.3390/polym14030509.

[8] K. C. Shekar, B. Singaravel, S. D. Prasad, N. Venkateshwarlu, Effect of fiber orientation on the flexural properties of glass fiber reinforced, epoxy-matrix composite. Materials Science Forum, 969, 502-507, 2019. http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.969.502.

[9] S. Kangishwar, N. Radhika, A. A. Sheik, A. Chavali, S. Hariharan, A comprehensive review on polymer matrix composites: material selection, fabrication, and application. Polymer Bulletin, 80, 47-87, 2023. http://doi.org/10.1007/s00289-022-04087-4.

[10] K. Niendorf and B. Raeymaekers, Additive manufacturing of polymer matrix composite materials with aligned or organized filler material: A review. Advanced Engineering Materials, 23, 2001002, 2021. http://doi.org/10.1002/adem.202001002.

[11] S. Sajan and D. P. Selvaraj, A review on polymer matrix composite materials and their applications. Materials Today: Proceedings, 47, 5493-5498, 2021. http://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.034.

[12] X. Zhao, S. Lu, W. Li, S. Zhang, K. Li, K. Nawaz, P. Wang, G. Yang, A. Ragauskas, S. Ozcan, E. Webb, Epoxy as Filler or Matrix for Polymer Composites, Epoxy-Based Composites. IntechOpen, 2022. http://doi.org/10.5772/intechopen.102448.

[13] R. Saminathan, H. Hadidi, Y. A. Fageehi, P. Manoj Kumar, M. Venkatasudhahar, Ankit, S. Ram, D. T. Gebreyohannes, Experimental analysis of mechanical and thermal characteristics of luffa/epoxy polymer composite under the influence of nanosilica. Advances in Materials Science and Engineering, 2022, 1-9, 2022. http://doi.org/10.1155/2022/6040629.

[14] W. Ahmed, S. Siraj, A. H. Al-Marzouqi, 3D printing PLA waste to produce ceramic based particulate reinforced composite using abundant silica-sand: mechanical properties characterization. Polymers, 12, 2579, 2020. http://doi.org/10.3390/polym12112579.

[15] J. S. Jang, H. Kim, R. F. Gibson, J. Suhr, Effective in situ material properties of micron-sized SiO2 particles in SiO2 particulate polymer composites. Materials & Design, 51, 219-224, 2013. http://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.04.025.

[16] C. L. Poh, M. Mariatti, M. N. Ahmad Fauzi, C. H. Ng, C.K. Chee, T. P. Chuah, Tensile, dielectric, and thermal properties of epoxy composites filled with silica, mica, and calcium carbonate. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 25, 2111-2119, 2014. http://doi.org/10.1007/s10854-014-1847-9.

[17] H. S. Jo, G. W. Lee, Investigation of mechanical and thermal properties of silica-reinforced epoxy composites by using experiment and empirical model. Materials Today: Proceedings, 4, 6178-6187, 2017. http://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.113.

[18] J. Sh. AbdulRazaq, A. K. F. Hassan, N. H. Jasim, Characterization of the mechanical properties and thermal conductivity of epoxy-silica functionally graded materials. AIMS Materials Science, 10, 182-199, 2023. http://doi.org/10.3934/matersci.2023010.

[19] K. Bharadwaja, S. Srinivasa Rao, T. B. Rao, Investigation of tensile and flexural behavior of epoxy and SiO2 composite: An experimental study. Materials Today: Proceedings, 45, 2649-2652, 2021. http://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.514.

[20] M. M. Abd, H. I. Jaffer, E. A. Al-Ajaj, Comparison study of some mechanical properties of micro and nano silica EP composites. Iraqi Journal of Physics, 10, 62-68, 2012. http://doi.org/10.13140/RG.2.2.23605.42725.

[21] J. Žigon, M. Karež, M. Pavlič, Surface finishing of 3D-printed polymers with selected coatings. Polymers, 12, 2797, 2020. http://doi.org/10.3390/polym12122797.

[22] P. L. Teh, M. Mariatti, H. M. Akil, C. K. Yeoh, K. N. Seetharamu, A. N. R. Wagiman, K. S. Beh, The

properties of epoxy resin coated silica fillers composites. Materials Letters, 61, 2156-2158, 2007. http://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.08.036.

[23] K. M. Lee, H. Park, J. Kim, D. M. Chun, Fabrication of a superhydrophobic surface using a fused deposition modeling (FDM) 3D printer with poly lactic acid (PLA) filament and dip coating with silica nanoparticles. Applied Surface Science, 467-468, 979-991, 2019. http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.10.205.

[24] H. Yang, F. Ji, Z. Li, S. Tao, Preparation of hydrophobic surface on PLA and ABS by fused deposition modeling. Polymers, 12, 1539, 2020. http://doi.org/10.3390/polym12071539.

[25] Y. Tu, F. Zhou, Y. Cheng, H. Jiang, C. Wang, F. Bai, J. Lin, The control mechanism of micron and nano SiO2 /epoxy composite coating on surface charge in epoxy resin. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 25, 1275-1284, 2018. http://doi.org/10.1109/TDEI.2018.007188.

[26] S. Hiremath, J. F. Dsouza, D. S. Chiniwar, H. M. Vishwanatha, B. Mallikarjuna, Exploring the impact of epoxy coated 3D-Printed polymers on surface roughness and mechanical behavior: An experimental and numerical study. Results in Engineering, 23, 102779, 2024. http://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102779.

[27] J. M. Chacón, M. A. Caminero, E. García-Plaza, P. J. Núñez, Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. Materials & Design, 124, 143-157, 2017. http://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065.

[28] Y. Jiang, K. Tohgo, Y. Shimamura, Ultrasonic dispersion of SiO2 particles in glassy epoxy resin. Journal of Composite Materials, 46, 1159-1168, 2012. http://doi.org/10.1177/0021998311413688.

[29] Md. Q. Tanveer, G. Mishra, S. Mishra, R. Sharma, Effect of infill pattern and infill density on mechanical behaviour of FDM 3D printed Parts- a current review. Materials Today: Proceedings, 62, 100-108, 2022. http://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.310.

[30] N. Maguluri, G. Suresh, K. V. Rao, Assessing the effect of FDM processing parameters on mechanical properties of PLA parts using Taguchi method. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 36, 1472-1488, 2023. http://doi.org/10.1177/08927057211053036.

[31] K. S. Seol, P. Zhao, B. C. Shin, S. U. Zhang, Infill print parameters for mechanical properties of 3D printed PLA parts. Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 17, 9-16, 2018. http://doi.org/10.14775/ksmpe.2018.17.4.009.

[32] A. Pandzic, D. Hodzic, A. Milovanovic, Effect of infill type and density on tensile properties of PLA material for FDM process, DAAAM Proceedings, DAAAM International Vienna, 0545-0554, 2019. http://doi.org/10.2507/30th.daaam.proceedings.074.

[33] C. Abeykoon, P. S. Amphorn, A. Fernando, Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 3, 284-297, 2020. http://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2020.03.003.

[34] B. M. Tymrak, M. Kreiger, J. M. Pearce, Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. Materials & Design, 58, 242-246, 2014. http://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.038.

[35] G. Dharmalingam, M. A. Prasad, S. Salunkhe, Investigation of impact strength at different infill rates biodegradable PLA constituent through fused deposition modeling. Materials Today: Proceedings, 62, 551-558, 2022. http://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.591.

[36] Y. Taha, M. Hamoud, A. Barakat, A study on mechanical properties and building time of PLA 3D printed parts with rectilinear pattern, variable layer thicknesses, build directions, and infill percentages. MSA Engineering Journal, 2024. http://doi.org/10.21608/msaeng.2024.251794.1350.

[37] M. Hamoud, S. Salunkhe, L. Cepova, H. M. A. Hussien, The impact of various filling patterns and building orientations on the mechanical characteristics and building time of PLA using FDM. International Journal of Polymer Science, 2024, 1752769, 2024. http://doi.org/10.1155/2024/1752769.

[38] N. Maguluri, G. Suresh, S. R. Guntur, Effect of printing parameters on the hardness of 3D printed poly-lactic acid parts using DOE approach. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1248, 012004, 2022. http://doi.org/10.1088/1757-899X/1248/1/012004.

[39] G. Dakhil, R. Salih, A. Hameed, Influence of infill pattern, infill ratio on compressive strength and hardness of 3D printed polylactic acid (PLA) based polymer. Journal of Applied Sciences and Nanotechnology, 3, 1-7, 2023. http://doi.org/10.53293/jasn.2022.4745.1141.

[40] M. M. Hanon, J. Dobos, L. Zsidai, The influence of 3D printing process parameters on the mechanical performance of PLA polymer and its correlation with hardness. Procedia Manufacturing, 54, 244-249, 2021. http://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.07.038.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 865-873

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Dondurarak kurutulmuş bal tozu üretimi; fizikokimyasal ve teknolojik özelliklerinin belirlenmesi

Production of freeze-dried honey powder; determination of its physicochemical and technological properties

Şeyda Yanardağ Karabulut[1,*], Gülce Bedis Kaynarca[2], Hatice Şanlıdere Aloğlu[3], Harun Uran[4]

[1,2,3,4] *Kırklareli University, Department of Food Engineering, Kırklareli Türkiye*

Öz

En yüksek bal içeriğine, en yüksek verime ve aynı zamanda iyi fizikokimyasal ve teknolojik özelliklere sahip bal tozu elde etmek için üç farklı taşıyıcı ajan (peynir altı suyu protein izolatı, maltodekstrin ve sığır jelatini) iki farklı bal: taşıyıcı oranı (60:40 ve 70:30) ve üç farklı besleme katı konsantrasyon oranı (%20, %30 ve %40 bal+taşıyıcı) parametreleri kullanılarak çalışılmıştır. Dondurarak kurutulmuş (liyofilize) örneklerde, düşük su aktivitesi (0.238), nem (%2.78), higroskopi (%13.05), Hausner oranı (HR) (1.049), Carr indeks (CI) (4.651) ve yüksek çözünürlük (32.5 saniye) parametreleri en iyi olan örnek, besleme çözeltisinin katı konsantrasyonunun (bal + taşıyıcı) %30 olduğu, bal:taşıyıcı oranının ise 60:40 olduğu formülasyonda taşıyıcı olarak maltodekstrinin kullanıldığı örnek grubu olarak belirlenmiştir. Higroskopitesi oldukça yüksek bir ürün olan balın taşıma, muhafaza ve ürün formülasyonlarında kullanılabilirliğini geliştirmek için toz formuna dönüştürülmesi önemlidir. Bu çalışma ile geliştirilen toz ürünlerin sütlü tatlılar, unlu mamüller ve şekerleme formülasyonlarında sakkaroza alternatif olabileceği düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Bal tozu, Dondurarak kurutma, Peynir altı suyu protein izolatı, Maltodekstrin, Sığır jelatini

Abstract

In order to obtain honey powder with the highest honey content, the highest yield, and simultaneously good physicochemical and technological properties, three different carrier agents (whey protein isolate, maltodextrin, and bovine gelatin), two different honey-to-carrier ratios (60:40 and 70:30), and three different feed solid concentration ratios (20%, 30%, and 40% honey + carrier) were investigated. Among the freeze-dried (lyophilized) samples, the formulation in which maltodextrin was used as the carrier agent, with a feed solution solid concentration (honey + carrier) of 30% and a honey-to-carrier ratio of 60:40, was determined to be the optimal group. This formulation exhibited the best parameters, including low water activity (0.238), moisture content (2.78%), hygroscopicity (13.05%), Hausner ratio (HR) (1.049), Carr index (CI) (4.651), and high solubility (32.5 seconds). Given that honey is a highly hygroscopic product, its conversion into powder form is crucial for improving its transportation, storage, and usability in product formulations. The honey powder developed in this study is considered a potential alternative to sucrose in dairy desserts, bakery products, and confectionery formulations.

Keywords: Honey powder, Freeze-drying, Whey protein isolate, Maltodextrin, Bovine gelatine.

1 Giriş

Bal; bal arılarının (*Apis mellifera* L.) bitkilerden topladığı nektar, bitki salgısı ve bazı bitki emen böceklerin dışkılarına tükürük salgılarını ilave edip peteklerde olgunlaştırdıkları, eşsiz tada sahip doğal tatlı bir üründür [1, 2, 3]. Polifenol, organik asit, enzim, amino asit gibi mikro bileşenlerce (180'den fazla biyoaktif bileşik) zengin olmasının yanı sıra sayılamayan tıbbi, besleyici, antimikrobiyel, antioksidatif ve prebiyotik (içerdiği oligosakkaritler sayesinde) özellikleri ile de fonksiyonel bir gıda olarak kabul edilmektedir [3, 4, 5, 6, 7]. Balın antioksidan özellikleri hem enzimatik (glikoz oksidaz, katalaz, peroksidaz vb.) hem de enzimatik olmayan maddelerden (karotenoidler, α-tokoferol, flavonoidler, fenolik asitler vb.) kaynaklanır [8]. Balın sahip olduğu bütün bu özellikler tüketici talebini artırmakla birlikte farklı gıda ürünlerine fonksiyonel özellik kazandırmak amacıyla da kullanım alanı bulmaktadır [9]. Şekerleme ve fırıncılık ürünlerinde şeker ikamesi olarak, sosis, et köftesi, balık, meyve ve sebze gibi gıdalarda ise raf ömrünü ve/veya biyoaktif bileşence zenginleştirme amacıyla kullanılmaktadır [9]. Bütün bu olumlu özelliklerine rağmen balın gıda bileşeni olarak kullanımı, yüksek viskozitesi ve higroskopite ayrıca kristalizasyona yatkınlığı nedeniyle zorluk teşkil etmektedir. Isıl işlem gören gıdalarda kullanımı ise kanserojen bir bileşen olan hidroksimetilfurfural içeriğinin artması nedeniyle sınırlıdır [6, 7]. Balın raf ömrü boyunca kristalleşmesi ile birlikte su aktivitesinin artması balda mayalar tarafından istenmeyen fermantasyona neden olabilmektedir [4, 10]. Bu sorunların üstesinden gelmek ve

* * Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: seydakarabulut@klu.edu.tr (Ş. Yanardağ Karabulut)
Geliş / Received: 19.03.2025 Kabul / Accepted: 17.04.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1660966

bal tüketimini artırmak için çeşitli kurutma teknikleriyle bal tozu, granül bal, bal gevreği gibi bal bazlı yeni ürünler geliştirilmektedir [2, 7, 11]. Bu ürünlerden biri olan bal tozu; sprey, vakum ve mikrodalga vakumlu kurutma gibi farklı kurutma yöntemleriyle üretilebilmektedir [11]. Bal tozu; paketleme ve taşıma kolaylığı sağlayarak, balın fermantasyonu önler, raf ömrünü artırır ve gıda endüstrisinde kullanım kolaylığı sağlar [7, 10]. Ayrıca kuru karışımlara, çeşnilere veya kuru kaplamalara doğrudan eklenebilme kolaylığı da sağlamaktadır [12].

Camsılığa geçiş sıcaklığı (T_g), özellikle düşük su içeriğine sahip sistemlerde (dondurulmuş gıdalar, kurutulmuş gıdalar, ekstrüde edilmiş gıdalar ve şekerlemeler) daha fazla önem arz etmektedir [12]. Tg'si -27 ile -51 °C arasında değişen bal gibi şeker açısından zengin gıdalarda, gıdanın amorf yapısını artırıcı bir proses olan kurutma işleminin uygulanması glukoz (~%31, T_g: 31 ºC) ve fruktoz (~%38, T_g: 5 ºC) gibi camsı yapıdaki düşük moleküler ağırlıklı şekerlerden dolayı zordur [3, 5, 6, 7, 9, 11]. Bu durum toz partiküllerinde yapışkanlık ve topaklaşma sorunlarına yol açar. Bu nedenlerden dolayı sıvı balın toz haline başarılı bir şekilde dönüştürülebilmesi ve bu sorunların aşılabilmesi için yüksek molekül ağırlıklı taşıyıcı maddelerin bala eklenmesi gerekmektedir [6, 7, 9, 11].

Protein, karbonhidrat, diyet lif gibi polimerik gıda bileşenleri bal tozu üretiminde kullanılan dolgu malzemeleridir [13]. Bu amaçla maltodekstrin, arabik gam, peynir altı suyu proteini izolatı veya sodyum kazeinat gibi taşıyıcılar kullanılmaktadır [9]. Taşıyıcı ajanlarla birlikte akışkanlık maddesi olarak gliserol monostearat ve topaklanmayı önleyici madde olarak trikalsiyum fosfat, kalsiyum stearat ve magnezyum karbonat kullanılabilmektedir [14, 15]. Bu taşıyıcılar molekül ağırlıkları ile doğru orantılı olarak T_g'yi artırmaktadırlar [9, 16]. Bu çalışmada kullanılan peynir altı suyu protein izolatı, maltodekstrin ve sığır jelatinin molekül ağırlıkları sırasıyla 18 kDa [17], 937-2225 Da [18] ve 22 kDa [19] olarak bilinmektedir. Bunların yanı sıra peynir altı suyu protein izolatı veya sodyum kazeinat gibi düşük miktarlarda yüzey aktif maddelerin eklenmesi balın kapsüllenmesini de sağlamaktadır [16].

Dondurarak kurutma yavaş ve pahalı bir kurutma yöntemi olmasına rağmen yüksek kaliteli kuru gıda ürünleri üretilmesine olanak sağlar. Dondurarak kurutma işlemi sırasında su, süblimasyon yoluyla donmuş üründen çıkarılır [17]. Dondurarak kurutma oksijensiz ortamda düşük sıcaklıkta kurutma sağladığı için yüksek uçucu bileşik içeriği, ısıya duyarlı bileşiklerin ve aromanın korunması, yapının korunması, besinsel ve biyoaktif özelliklerin korunması, enzimatik olmayan veya oksidatif reaksiyonlardan kaynaklanabilecek hasarların düşük olması gibi bazı avantajlara sahiptir [7]. Yapılan bir çalışmada liyofilize bal tozunun daha yüksek α-amilaz aktivitesi ve daha düşük hidroksimetilfurfural içeriği ile püskürtmeli kurutucuda kurutulmuş bal tozundan daha iyi kalite özelliklerine sahip olduğu belirlenmiştir [10]. Başka bir çalışmada ise liyofilizasyon işleminin balın toplam fenolik madde içeriğini % 21-32 azaltmasına rağmen antioksidan aktivitesini değiştirmediğini göstermiştir [18].

Bu çalışmanın amacı, yüksek bal içeriğine, yüksek verime sahip olan ve aynı zamanda iyi fizikokimyasal ve teknolojik özelliklerde bal tozu elde etmektir. Bal, birçok ısıya duyarlı bileşen içerir ve ısıl işlem sırasında bu ısıya duyarlı moleküllerin zarar görme ve balın kalitesini düşürme olasılığı vardır [19]. Bu nedenle balın kurutulmasında dondurarak kurutma (liyofilizasyon) yöntemi tercih edilmiştir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde balın liyofilizatör ile kurutulmasında taşıyıcı olarak genellikle maltodekstrin, peynir altı suyu protein izolatı ve arabik gamın kullanıldığı görülmektedir [6, 7, 10, 12, 14, 20, 22]. Bu çalışmada ise peynir altı suyu protein izolatı (P) ve maltodekstrinin yanı sıra (M) farklı olarak sığır jelatini (J) kullanılmıştır. Literatür verilerine benzer olarak [6, 7, 10, 12, 14, 20, 22] kurutma petrilerine dökülecek solüsyonlar 60:40 ve 70:30 bal:taşıyıcı içerecek şekilde iki farklı konsantrasyonda hazırlanmıştır. Literatür çalışmalarından farklı olarak kurutulacak solüsyonların katı madde miktarı, toz verimi ve kalitesine etkisini görmek için farklı oranlarda (%20, %30 ve %40 bal+taşıyıcı) hazırlanmıştır. Elde edilen toz balların renk, su aktivitesi, nem, yığın yoğunluk, sıkıştırılmış yoğunluk, çözünürlük, higroskopite, % geri kazanım ve bal+taşıyıcıdan uzaklaştırılan % su değerleri incelenmiştir.

2 Materyal ve metot

2.1 Materyal

Bu çalışma Kırklareli bölgesindeki arıcılardan temin edilen coğrafi işaretli meşe balı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Taşıyıcı ajan olarak ise peynir altı suyu protein izolatı (Alfasol, Türkiye), maltodekstrin (Alfasol, Türkiye) ve sığır jelatini (Tijda, Türkiye) kullanılmıştır.

2.2 Bal solüsyonlarının hazırlaması ve liyofilizasyonu

Bal ve taşıyıcı maddeler, Tablo 1'de belirtilen oranları sağlayacak miktarda tartılıp saf su içerisinde, manyetik karıştırıcıda, oda sıcaklığında tamamen çözündürülmüştür. Petrilere 20 ml örnek yaklaşık 2-3 mm kalınlığında dökülmüştür. Karışım -80 ºC'de 24 saat dondurulduktan sonra 72 saat boyunca 0.112 mbar basınçta liyofilizatörde (TRS4-4DS, Teknosem Corp., İstanbul, Türkiye) kurutulmuştur. Toz örnekler vakum ambalajlanarak analize kadar -18 ºC'de depolanmıştır.

2.3 Renk analizi

Renk parametreleri olan L* (parlaklık, siyah(0)-beyaz(100)), a* (kırmızı(+)-yeşil(-)) ve b* (sarı(+)-mavi(-)) değerleri Konica Minolta Chromo Meter CR-400 (Tokyo, Japonya) cihazı ile belirlenmiştir.

2.4 Su aktivitesi tayini

Bal tozu örneklerinin su aktivitesi, ±0.001 hassasiyete sahip su aktivitesi ölçüm cihazı (Novasina LabSwift, Lachen, İsviçre) kullanılarak belirlenmiştir.

2.5 Nem tayini (%)

Toz örneklerin % nem içeriği, 105 °C'de 4 saat boyunca etüvde (Nüve, FN055, Türkiye) kurutulmasıyla gravimetrik olarak belirlenmiştir [20].

Tablo 1. Liyofilizasyon için hazırlanan örnek grupları

Örnek kodu	Taşıyıcı adı	Bal:taşıyıcı oranı	Besleme çözeltisi katı konsantrasyonu (%)
6/P20	Peynir altı suyu protein izolatı	60:40	20
6/P30	Peynir altı suyu protein izolatı	60:40	30
6/P40	Peynir altı suyu protein izolatı	60:40	40
6/M20	Maltodekstrin	60:40	20
6/M30	Maltodekstrin	60:40	30
6/M40	Maltodekstrin	60:40	40
6/J20	Sığır jelatini	60:40	20
6/J30	Sığır jelatini	60:40	30
6/J40	Sığır jelatini	60:40	40
7/P20	Peynir altı suyu protein izolatı	70:30	20
7/P30	Peynir altı suyu protein izolatı	70:30	30
7/P40	Peynir altı suyu protein izolatı	70:30	40
7/M20	Maltodekstrin	70:30	20
7/M30	Maltodekstrin	70:30	30
7/M40	Maltodekstrin	70:30	40

2.6 Yığın yoğunluk ve sıkıştırılmış yoğunluk tayini

Toz örneklerin yığın yoğunluğu (ρB) Santhalakshmy vd. [21]'nin, sıkıştırılmış yoğunluk (ρT) ise Suhag vd. [8]'nin önerdiği prosedür uygulanarak belirlenmiştir. Yığın yoğunluk için: 1 g toz 10 ml'lik dereceli bir silindire yüklenip işgal edilen hacim kaydedilmiş ve daha sonra yığın yoğunluğunu (ρB) hesaplamak için kullanılmıştır. Sıkıştırılmış yoğunluk için; iki gram toz, 10 ml'lik boş bir dereceli silindirde el ile 10 cm yükseklikten bir tezgâha 40 kez vurularak ve tozun kütlesinin numunenin kapladığı hacme bölünmesiyle hesaplanmıştır. Yığın yoğunluk ve sıkıştırılmış yoğunluk değerlerinden Jinapong vd. [22] önerdiği şekilde tozun akışkanlığını gösteren Carr indeks (CI) değeri Denklem (1) ve yapışkanlığını gösteren Hausner oranı (HR) Denklem (2)'ye göre belirlenmiştir [23]

$$CI = \left[\frac{\rho T - \rho B}{\rho T}\right] \times 100 \quad (1)$$

$$HR = \frac{\rho T}{\rho B} \quad (2)$$

2.7 Çözünürlük tayini

Tozların çözünürlüğü, oda sıcaklığında 100 ml'lik bir cam beher içindeki 25 ml damıtılmış suya 1 g örnek ilave edilerek ölçülmüştür. Karışım, 875 rpm'de (karıştırma çubuğu 5 mm x 15 mm) manyetik bir karıştırıcıyla çalkalanmış ve tamamen çözünmesi için gereken süre kaydedilmiştir [16].

2.8 Higroskopisite tayini

Higroskopisite için, 1g toz örnek tartım kaplarına konulduktan sonra 25°C'de içerisinde %75.3 bağıl nemi sağlayacak olan doygun NaCl çözeltisi içeren desikatöre yerleştirilmiş ve 1 hafta boyunca belirli aralıklarla tartım alınarak en sonundaki kütle artışı hesaplanmıştır. Higroskopik oranı (g H_2O/dk, bal tozunun ağırlık değişiminin eğimi) ve 100 g kuru katı başına bir hafta sonra emilen nem g olarak ifade edilen higroskopik indeksi elde etmek için numuneler ilk 4 saat boyunca saatte bir tartılmıştır [16].

2.9 Kurutmada % geri kazanım oranı tayini

Toz geri kazanımı Denklem (3)'e göre hesaplanmıştır [16].

$$\%\ geri\ kazanım\ = \frac{M_1}{M_2} \times 100 \quad (3)$$

M_1 beslemedeki katı madde (g) miktarını, M_2 ise liyofilizasyon sonrası tartımı (g) göstermektedir.

2.10 Kurutmada bal ve taşıyıcı kitlesinden uzaklaştırılan % su miktarı tayini

Bal ve taşıyıcı kitlesinden uzaklaştırılan % su miktarı Denklem (4)'e göre hesaplanmıştır.

$$uzaklaştırılan\ \%\ su\ miktarı\ = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (4)$$

M_1 beslemedeki katı madde (g) miktarını, M_2 ise liyofilizasyon sonrası tartımı (g) göstermektedir.

2.11 İstatistiksel analiz

Örnek grupları arasındaki farklılık varyans analizi, tek yönlü varyans analizi (ANOVA), çoklu karşılaştırmalar (Post Hoc Multiple Comparisons) ile, değişkenler arasındaki ilişki ise Pearson korelasyonu ile SPSS 22 (SPSS Inc., Chicago, USA) programında değerlendirilmiştir. Posthoc testlerinden Duncan, çoklu karşılaştırma testi) kullanılmıştır. Farklılıktaki anlamlılık düzeyi P <0.05 olarak belirlenmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Renk analizi

Bal tozunun rengi tüketici beğenisi açısından önem taşımaktadır. Bal; çeşidine bağlı olarak rengi açık sarıdan kehribar rengine hatta siyaha kadar değişen geniş renk skalasına sahip bir üründür. Bu çalışmada kullanılan meşe balı için L*, a* ve b* değerleri sırasıyla 44.48±0.30, 30.41±1.13 ve 28.69±0.70 olarak belirlenmiştir. Tablo 2'de görüldüğü üzere iyi bir bal tozu için istenen düşük L* değeri bal oranı artırılarak elde edilebilir. Tablodaki negatif a* değerleri yeşillik düzeyini gösterirken, pozitif b* değerleri ise sarılık düzeyini göstermektedir. Bal tozlarının renk değerleri meşe balının renk değerleri ile kıyaslandığında L* değerinde artış a* ve b* değerlerinde ise azalma görülmektedir. L* değerindeki artışın taşıyıcı varlığından kaynaklandığı ve buna bağlı olarak elde edilen tozun daha beyaz olmasına neden olduğu düşünülmektedir.

Örnek gruplarının L* değerleri, taşıyıcı türü yönünden kıyaslandığında, aralarındaki farklılık istatistiksel olarak önemli olup; meşe balına en yakın değerler sırasıyla jelatin, maltodekstrin ve peynir altı suyu protein izolatı içeren örnek gruplarında görülmüştür (P <0.05). Bu sıralama a* değeri için jelatin, peynir altı suyu protein izolatı ve maltodekstrin şeklinde iken b* değeri için ise jelatin, maltodekstrin ve peynir altı suyu protein izolatı şeklindedir. Bu durum taşıyıcıların renk ve çözünürlük özelliklerindeki farklılık ile

açıklanabilir. Nitekim maltodekstrin ve jelatin çözündüğünde saydam ve homojen bir çözelti oluştururken peynir altı suyu protein izolatı ise opak ve beyazımsı bir çözelti oluşturmaktadır. Ayrıca jelatin maltodekstrine kıyasla daha sarıya yakın bir toz niteliğindedir. Dolayısıyla elde edilen tozların renk değerleri arasındaki farklılık istatistiksel olarak önemli bulunmuştur (Şekil 3).

Oses vd. [16] yaptıkları çalışmada, liyofilize bal örneklerinin L*, a*, b* değerlerini peynir altı suyu protein izolatı içeren örnekler için sırasıyla 66.89-78.31; 2.40-5.72; 22.49-27.73 ve maltodekstrin içeren örnekler için ise 69.46-83.05; 1.15-6.04; 20.92-29.05 olarak belirlemişlerdir. Çalışmamızda elde ettiğimiz sonuçlar Oses vd. [16]'nin sonuçları ile kıyaslandığında hem peynir altı suyu içeren hem de maltodektrin içeren örnek gruplarının L* değerleri (78.18-95.84) daha yüksek iken a* ((-0.57)-1.2) ve b* (12.06-20.86) değerleri daha düşüktür. Aynı taşıyıcıların kullanıldığı ve bal:taşıyıcı oranının 60:40 olduğu başka bir liyofilize bal tozu çalışmasında ise L*, a*, b* değerleri peynir altı suyu protein izolatı içeren örnekler için sırasıyla 86.65-89.18; (-0.84)-(-0.04); 7.64-12.82 ve maltodekstrin içeren örnekler için ise 90.30-91.55; (-0.05)-(0.01); 8.14-12.52 olarak belirlenmiştir [17]. Bal:taşıyıcı oranının 60:40 olduğu örnek gruplarından peynir altı suyu içeren tozların L* (93.64-95.84), a* ((-0.07)-(-0.02)), b* (14.65-15.23) değerleri Ganaie vd. [17]'nin sonuçlarından daha yüksek iken maltodekstrin içeren tozların ise L* (78.18-89.07) değerleri daha düşük, a* ((-0.57)-0.22) ve b* (12.06-19.25) değerleri daha yüksek bulunmuştur. Cantero vd.'nin [7] yaptığı çalışmada ise (bal:maltodekstrin oranı 75:25; toplam katı konsantrasyonu %45) bu değerler 75.88-87.71, (-1.75)-2.85, 10.82-28.73 olarak belirlenmiştir.

Tablo 2. Bal tozlarının renk analizi sonuçları

Örnek kodu	L*	a*	b*
Bal	44.48±0.30^{j}	30.41±1.13^{a}	28.69±0.70^{a}
6/P20	93.64 ± 0.02^{b}	-0.02 ± 0.02^{h}	14.65 ± 0.03^{k}
6/P30	95.84 ± 0.23^{a}	-0.07 ± 0.01^{h}	15.22 ± 0.02^{j}
6/P40	95.37 ± 0.17^{a}	-0.02 ± 0.01^{h}	15.23 ± 0.01^{j}
6/M20	89.07 ± 1.56^{d}	-0.57 ± 0.01^{j}	12.06 ± 0.28^{l}
6/M30	78.18 ± 1.17^{g}	-0.31 ± 0.04^{i}	17.75 ± 0.15^{h}
6/M40	84.24 ± 1.68^{f}	0.22 ± 0.07^{f}	19.25 ± 0.04^{ef}
6/J20	78.92 ± 2.35^{g}	0.14 ± 0.22^{fg}	15.51 ± 0.48^{j}
6/J30	56.67 ± 0.10^{i}	2.28 ± 0.16^{b}	21.87 ± 0.32^{c}
6/J40	70.11 ± 0.01^{h}	-0.04 ± 0.00^{h}	22.73 ± 0.07^{b}
7/P20	83.63 ± 0.06^{f}	1.20 ± 0.02^{c}	20.86 ± 0.03^{d}
7/P30	87.91 ± 0.03^{d}	0.88 ± 0.02^{d}	19.07 ± 0.02^{f}
7/P40	88.56 ± 0.06^{d}	0.66 ± 0.00^{e}	18.70 ± 0.06^{g}
7/M20	86.35 ± 0.00^{e}	0.03 ± 0.02^{gh}	19.46 ± 0.09^{e}
7/M30	88.58 ± 0.31^{d}	14.65 ± 0.03^{i}	17.04 ± 0.53^{i}
7/M40	91.34 ± 0.03^{c}	-0.02 ± 0.02^{h}	17.79 ± 0.09^{h}

a-l: aynı sütunda farklı küçük harf ile gösterilen ortalamalar arasındaki fark istatistiksel olarak önemlidir (P < 0.05).

3.2 Su aktivitesi tayini

Gıda stabilitesi açısından indikatör olarak kabul edilen ve mikroorganizmaların kullanabileceği serbest suyun bir ölçüsü olan su aktivitesi, balın mikrobiyel bozulmasının takibi için kritik önem teşkil etmektedir [24]. Dolayısıyla su aktivitesi liyofilize bal tozunun stabilitesini etkileyen önemli bir parametredir. Tablo 3 incelendiğinde bal oranı artınca su aktivitesinin arttığı gözlenmektedir. Bal oranındaki artış ile gözlenen su aktivitesi artışı balın içeriği ile açıklanabilir. Nitekim gıdanın şeker içeriği yükseldikçe kurutma verimi düşmekte dolayısıyla su aktivitesi ve nemde artış görülmektedir. Ayrıca örnek solüsyonunun katı madde içeriği %20'den %40'a çıkarıldığında maltodekstirinli örneklerde su aktivitesi artış göstermiştir. Bu durum katı madde içeriğindeki artışın kurutma verimini azalttığını göstermektedir. Su aktivitesi maltodekstrin içeren örnek grubunda daha düşük değerlere sahip iken, jelatin içeren örnek grubunda en yüksek değerleri sergilemiştir. Bu durumun hidrofilik ve hidrofobik denge farklılığından ve protein karakterizasyonundaki taşıyıcının suyu bağlayarak buharlaşmayı önlemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir [26]. Yapılan istatistiksel analiz sonuçlarına göre farklı taşıyıcı türlerine sahip örnek gruplarının su aktivitesi değerleri arasındaki farklılık önemli bulunmuştur (P <0.05).

Oses vd. [16] yaptıkları liyofilize bal çalışmasında su aktivitesi değerlerini arabik gam, peynir altı suyu protein izolatı ve maltodekstrin içeren örnekler için sırasıyla 0.254-0.315; 0.250-0.263; 0.211-0.261 aralığında bulmuştur. Ganaie vd. [17] peynir altı suyu protein izolatı ve maltodekstrin içeren örneklerde su aktivitesini sırasıyla 0.249-0.264; 0.209-0.223 olarak belirlemiştir. Cantero vd. [7] ise maltodekstrin içeren liyofilize bal örneklerinde su aktivitesini 0.210-0.224 aralığında bulmuştur. Taşıyıcı kullanılmadan yapılan bal tozu çalışmalarında ise su aktivitesi 0.30 [25]ve 0.425-0.427 [2]olarak belirlenmiştir. Çalışmamızda elde ettiğimiz bal tozu örneklerine ait su aktivitesi değerlerinin 6/J40 grubu hariç olmak üzere (0.44) yukarıda verilen literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Tablo 3. Bal tozlarının fiziksel analiz sonuçları

Örnek	Su aktivitesi	% Nem	Çözünürlük (s)
6/P20	0.29 ± 0.01^{e}	9.10 ± 0.10^{c}	146.0 ± 22.0^{g}
6/P30	0.26 ± 0.01^{f}	7.69 ± 0.02^{d}	232.0 ± 10.0^{e}
6/P40	0.24 ± 0.00^{g}	6.60 ± 0.04^{e}	109.0 ± 19.0^{gh}
6/M20	0.22 ± 0.00^{h}	2.83 ± 0.22^{g}	49.5 ± 2.5^{ij}
6/M30	0.24 ± 0.01^{gh}	2.78 ± 0.18^{g}	32.5 ± 2.5^{j}
6/M40	0.27 ± 0.01^{f}	2.78 ± 0.00^{g}	37.5 ± 0.5^{j}
6/J20	0.37 ± 0.00^{c}	9.77 ± 0.00^{b}	757.0 ± 45.0^{c}
6/J30	0.39 ± 0.01^{b}	10.48 ± 0.00^{a}	1503.0 ± 40.0^{b}
6/J40	0.44 ± 0.01^{a}	10.85 ± 0.00^{a}	1954.0 ± 33.0^{a}
7/P20	0.33 ± 0.02^{d}	9.67 ± 0.27^{bc}	401.5 ± 21.5^{d}
7/P30	0.29 ± 0.01^{e}	9.17 ± 0.58^{bc}	105.5 ± 12.5^{h}
7/P40	0.34 ± 0.01^{d}	9.27 ± 0.29^{bc}	81.0 ± 6.0^{hi}
7/M20	0.30 ± 0.01^{e}	2.71 ± 0.13^{g}	185.5 ± 18.5^{f}
7/M30	0.31 ± 0.00^{e}	4.60 ± 0.92^{f}	198.0 ± 34.0^{ef}
7/M40	0.33 ± 0.00^{d}	3.25 ± 0.53^{g}	101.5 ± 5.5^{h}

a-j: aynı sütunda farklı küçük harf ile gösterilen ortalamalar arasındaki fark istatistiksel olarak önemlidir (P < 0.05).

3.3 Nem tayini (%)

Toz örneklerin nem içeriği akışkanlık, yığın yoğunluk, yapışkanlık ve depolama stabilitesi açısından önem taşımaktadır [5]. Çalışmamızda elde ettiğimiz bal tozu örneklerinin nem içerikleri incelendiğinde, bal oranının daha yüksek olduğu maltodekstrinli örnek gruplarının çoğunda nem içeriğinin %4'ün altında olduğu görülmektedir (Bk. Tablo 3). Ayrıca peynir altı suyu protein izolatı içeren örneklerin nem içeriğinin (%6.60-%9.67) maltodekstrinli örneklerden (%2.71-%4.60) daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum hidrofilik ve hidrofobik denge

farkından kaynaklanabileceği gibi, peynir altı suyu protein izolatındaki protein yapısının suyu bağlaması ve damlacıkları ince bir film tabakasıyla kaplayarak buharlaşmayı önlemesi ile de açıklanabilir [26]. Elde edilen bulgular istatistiksel olarak değerlendirildiğinde, farklı taşıyıcı içeren örnek gruplarının nem içerikleri arasındaki farkın istatistiksel olarak önemli olduğu belirlenmiştir (P <0.05).

Bal: taşıyıcı (maltodekstrin) oranının 1:2 olduğu bir çalışmada, liyofilize balın nem içeriği %4 olarak bulunmuştur [19]. Oses vd. [16]'nin yaptığı çalışmada ise arabik gam, peynir altı suyu protein izolatı ve maltodekstrin içeren grupların % nem içerikleri sırasıyla 4.09-5.12; 5.67-7.40 ve 1.90-3.42 olarak belirlenmiştir. Liyofilize bal üretim optimizasyonunun yapıldığı başka bir çalışmada örneklerin nem içerikleri %2.5-5.5 aralığında tespit edilmiştir [6]. Sramek vd. [4] ise taşıyıcı olarak %45 glikoz şurubu ve %1 peynir altı suyu protein izolatını kullandıkları çalışmada, toz örneğin nem içeriğini %3.1 olarak belirlemişlerdir. [25] farklı botanik kökenli bal çeşitleri ile yaptıkları çalışmada, örneklerin nem içeriklerini %1.30-1.63 aralığında bulmuşlardır. Taşıyıcı kullanılmadan gerçekleştirilen liyofilize bal çalışmalarında ise örneklerin nem içerikleri %4.17-5.24 [27] ve %10.1-11.5 [2] olarak belirlenmiştir. Bal tozu örneklerinin nem içeriklerinin kullanılan taşıyıcının özelliğine göre değişiklik gösterdiği yapılan çalışmalardan anlaşılmakta olup, bu çalışmada örnek gruplarının literatür ile büyük ölçüde uyumlu olduğu görülmektedir.

3.4 Çözünürlük tayini

Çalışmamızda elde ettiğimiz verilere göre %60 bal içeren maltodekstrinli örneklerin çözünürlüğü daha iyi bulunurken (32.5-49.5 saniye), bal içeriği %70 olan toz numunelerde genel olarak çözünürlük hızının yavaşladığı (81.0-401.5 saniye) gözlenmiştir (Bk. Tablo 3). Yapılan istatistiksel analiz sonuçlarına göre farklı taşıyıcıya sahip örnek gruplarının çözünürlükleri arasındaki fark önemlidir (P <0.05). Bu durum taşıyıcıların çözünme hızlarının farklı olması ile açıklanabilir. Nitekim maltodekstrin yapısı gereği peynir altı suyu protein izolatı ve jelatine kıyasla daha kolay ve homojen olarak çözünmektedir.

Rivero vd. [6] arabik gam ve peynir altı suyu protein izolatı kullanarak yaptığı liyofilize bal çalışmasında, elde edilen örneklerin çözünürlüğünü %70-92.1 aralığında belirlemişlerdir. Farklı botanik kökenli bal çeşitleri ile yapılan bir başka çalışmada ise çözünürlük (2g tozun 25 ml suda, oda sıcaklığında, 890 rpm'deki çözünürlüğü) değerleri 5.28-14.62 saniye aralığında bulunmuştur [7]. Çözünürlük süresi metotta baz alınan örnek miktarı, çözgen miktarı, çözme işleminin gerçekleştirildiği beherin hacmi, karıştırma hızı (rpm) ve karıştırma çubuğunun boyutlarına bağlı olarak değişebileği için literatür sonuçlarının çok geniş aralıkta değişkenlik göstermesi muhtemeldir. Sonuç olarak elde edilen toz ürünün çözünürlüğünün, taşıyıcının çözünürülüğüne bağlı olduğu söylenebilir. Buna bağlı olarak çözünürlüğü az ve yavaş olan peynir altı suyu protein izolatı ile hazırlanan toz balların çözünürlüğü daha yavaş olmuştur.

3.5 Yığın yoğunluk ve sıkıştırılmış yoğunluk tayini

Toz parçacıkların şekline, boyutuna ve yüzey özelliklerine bağlı olan yığın yoğunluk, paketleme ve taşıma maliyetlerini belirleyen önemli bir özelliktir. Düşük yığın yoğunluktaki tozlar için ambalajlama ve nakliye maliyetleri artacağından toz ürünlerde yüksek yığın yoğunluk arzu edilen bir durumdur [5]. Genel olarak tozların yığın yoğunluğu parçacık boyutuna bağlıdır ve parçacıklar ne kadar küçükse yığın yoğunluğu da o kadar yüksek olur [23]. Çalışmamızda örnek gruplarının yığın yoğunluk ve sıkıştırılmış yoğunluk değerlerinin sırasıyla 0.252 ile 0.500 ve 0.271 ile 0.537 g/ml arasında değiştiği tespit edilmiştir (Bk. Tablo 4). Peynir altı suyu protein izolatı içeren örneklerin yığın ve sıkıştırılmış yoğunluğu maltodekstrin içeren örneklerden yüksek olup, aralarındaki fark istatistik olarak önemli bulunmuştur (P < 0.05). Oses vd. [16] yaptıkları çalışmada maltodekstrin ve peynir altı suyu protein izolatı içeren liyofilize bal örneklerinde sıkıştırılmış yoğunluğu sırasıyla 0.64 ve 0.45 g/ml olarak belirlemişler ve sıkıştırılmış yoğunluktaki artışı aglomerasyon ile ilişkilendirmişlerdir. Buna bağlı olarak tozdaki bal oranı arttıkça aglomerasyonun ve dolayısıyla da sıkıştırılmış yoğunluğun arttığını belirtmişlerdir. Yapılan bir diğer liyofilize bal çalışmasında ise yığın yoğunluk ve sıkıştırılmış yoğunluk peynir altı suyu protein izolatı içeren örneklerde 0.5-0.52 ve 0.68-0.70 g/ml ve maltodekstrin içeren örneklerde 0.37-0.41 ve 0.52-0.55 g/ml olarak belirlenmiştir [17]. Rivero vd. [6]'nin yaptığı liyofilize bal çalışmasında, yığın yoğunluk ve sıkıştırılmış yoğunluk sırasıyla 0.42-0.50; 0.45-0.57 g/ml olarak belirlenmiştir. Farklı botanik kökenli bal çeşitleri ile yapılan çalışmada ise sıkıştırılmış yoğunluk 0.455-0.626 aralığında bulunmuştur [7]. Tablo 4 incelendiğinde yoğunluk değerlerinin literatür ile uyumlu olduğu ve bal oranı arttıkça sıkıştırılmış yoğunluğun da arttığı görülmektedir. Ayrıca arzu edilen yüksek yığın yoğunluk; peynir altı suyu protein izolatı içeren, besleme solüsyonunun katı konsantrasyonu ile bal oranı yüksek olan örneklerde bulunmuştur. İstatistiksel olarak besleme katı konsantrasyonlarından %20 ile %40 arasındaki farklılık önemli bulunmuştur (P <0.05). Ayrıca yığın yoğunluk ve sıkıştırılmış yoğunluk değerleri arasında yüksek pozitif korelasyon belirlenmiştir (r =0.991; P = 0.000). Sıkıştırılmış yoğunluk ve yığın yoğunluk değerlerinin nem değeri ile arasındaki pozitif korelasyon da önemli bulunmuştur (sırasıyla r =0.626; P = 0.026; r =0.569; P = 0.043).

Tozun akışkanlığını gösteren CI değeri Jinapong vd. [22]'in belirttiği üzere %15'in altında ise akışkanlığın iyi olduğunu, %45'in üzerinde ise kötü olduğunu göstermektedir. Tablo 4 incelendiğinde bütün toz örneklerinin akışkanlığının yüksek olduğu görülmektedir. Toz örneklerinin akışkanlıkları arasındaki farklılık katı konsantrasyonu bakımından önemli olup, en iyi akışkanlık sırasıyla %20, 40 ve 30 katı konsantrasyonuna sahip örnek gruplarında görülmüştür (P <0.05). En iyi akışkanlık gösteren örnek grubunun ise düşük CI değeri ile taşıyıcı olarak maltodekstrinin kullanıldığı, solüsyondaki bal oranının %70 olduğu ve solüsyonun katı konsantrasyonunun ise %20 olduğu örnek olmuştur.

Tozun yapışkanlığını gösteren HR değerleri incelendiğinde ise bal tozlarında bu oranın 1.000-1.133 arasında değiştiği görülmektedir (Bk. Tablo 4). Samborska vd. [23]'in yaptığı toz bal çalışmasında bu oranın 1.25'in üzerinde olması durumunda toz ürünün düşük yapışkanlık ve yüksek akışkanlık gösterdiği bildirilmiştir. Jinapong vd. [22]'nin yaptığı çalışmada ise HR değeri 1.2'nin altında ise düşük yapışkanlık, 1.4'ün üzerinde ise yüksek yapışkanlık şeklinde sınıflandırıldığı belirtilmiştir. Çalışmamızdaki örnek gruplarının hepsinin HR değeri 1.25'in altındadır. Örnek gruplarından en düşük HR değerine sahip olan toz bal ise taşıyıcı olarak maltodekstrinin kullanıldığı, solüsyondaki bal oranının %70 olduğu ve solüsyonun katı konsantrasyonunun ise %20 olduğu örnek olmuştur. Örnek gruplarının HR değerleri arasındaki farklılık taşıyıcı cinsi ve bal konsantrasyonu bakımından istatistiksel olarak önemli olup en iyi HR değerleri taşıyıcı olarak peynir altı suyu protein izolatı içeren örnek gruplarında iken, bal oranı bakımından ise %60 bal içeren örnek gruplarında görülmüştür (P <0.05). Bu durum peynir altı suyu protein izolatının maltodekstrine kıyasla daha iyi taşıyıcı özellik göstermesi ile açıklanabilir. Peynir altı suyu protein izolatı maltodekstrine kıyasla hem yüksek molekül ağırlığı hem de yüksek kapsülleme özelliği sayesinde daha iyi taşıyıcı özellik göstermiştir.

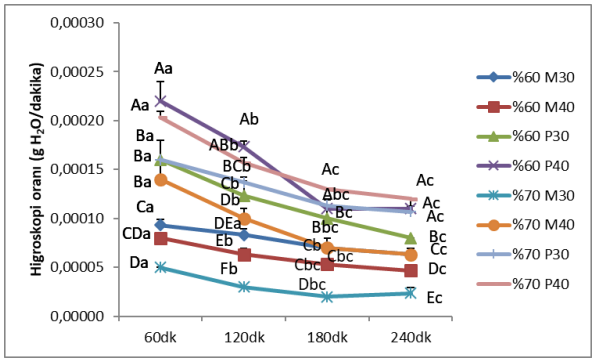
Tablo 4. Bal tozlarının yoğunluk analizi sonuçları

Örnek	Yığın yoğunluk (g/ml)	Sıkıştırılmış yoğunluk (g/ml)	CI	HR
6/P20	0.37 ± 0.02^{c}	0.40 ± 0.02^{c}	7.72 ± 0.38^{ab}	1.08 ± 0.01^{abc}
6/P30	0.42 ± 0.02^{b}	0.47 ± 0.03^{b}	11.64 ± 1.39^{a}	1.13 ± 0.02^{a}
6/P40	0.50 ± 0.01^{a}	0.54 ± 0.04^{a}	6.64 ± 5.11^{bc}	1.07 ± 0.06^{bc}
6/M20	0.25 ± 0.01^{d}	0.27 ± 0.02^{d}	6.85 ± 3.19^{bc}	1.07 ± 0.04^{bc}
6/M30	0.29 ± 0.02^{d}	0.30 ± 0.03^{d}	4.46 ± 2.89^{bc}	1.05 ± 0.03^{bcd}
6/M40	0.39 ± 0.01^{bc}	0.41 ± 0.01^{c}	5.10 ± 0.12^{bc}	1.05 ± 0.00^{bcd}
6/J20	*	*	*	*
6/J30	*	*	*	*
6/J40	*	*	*	*
7/P20	*	*	*	*
7/P30	0.47 ± 0.06^{a}	0.52 ± 0.05^{ab}	8.50 ± 2.77^{ab}	1.09 ± 0.03^{ab}
7/P40	0.49 ± 0.01^{a}	0.51 ± 0.03^{ab}	3.46 ± 0.00^{cde}	1.04 ± 0.04^{bcd}
7/M20	0.28 ± 0.02^{d}	0.28 ± 0.02^{d}	0.00 ± 0.00^{f}	1.00 ± 0.00^{d}
7/M30	*	*	*	*
7/M40	0.50 ± 0.01^{a}	0.52 ± 0.01^{ab}	2.91 ± 0.06^{de}	1.03 ± 0.00^{cd}

a-f: aynı sütunda farklı küçük harf ile gösterilen ortalamalar arasındaki fark istatistiksel olarak önemlidir (P <0.05); * Akışkan bir toz elde edilemediği için ölçülememiştir.

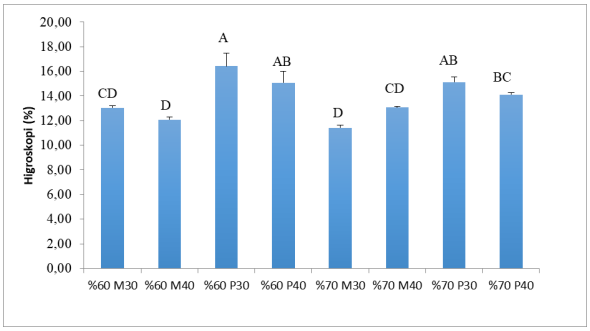
3.6 Higroskopisite tayini

Bal tozu, ihtiva ettiği fruktozun yüksek nem tutma kapasitesi nedeniyle doğası gereği oldukça higroskopiktir [7]. Araştırmamızda elde ettiğimiz verilere göre, higroskopik oran 4 saat sonunda tüm örneklerde azalmış ve ilk 1 saat tüm örnekler hızlı bir şekilde nem çekmiştir (Bk. Şekil 1). Higroskopik oran, bal oranı değişmeksizin en yüksek peynir altı suyu proteini içeren örneklerde olmuştur. %70 bal içeren ve taşıyıcı ajan olarak maltodekstrinin kullanıldığı örnekler en düşük higroskopik orana sahip toz örnek olarak belirlenmiştir. Peynir altı suyu protein izolatı içeren örnek guruplarından en keskin değişimi gösteren örneğin %60 bal içeren ve besleme katı konsantrasyonu %40 olan örnek grubu olduğu, maltodekstrin için ise %70 bal, %40 katı konsantrasyonlu örnek olduğu gözlenmiştir. Genel olarak %30 katı konsantrasyonlu örneklerin daha az higroskopik olduğu söylenebilir. Oses vd. [16] yaptıkları çalışmada peynir altı suyu protein izolatı içeren örneklerin higroskopik oranını, maltodekstrin içeren örneklerden daha yüksek olarak belirlemişlerdir. Ancak maltodekstrin ve peynir altı suyu protein izolatının liyofilizasyonda taşıyıcı olarak kıyaslandığı bir başka çalışmada ise, maltodekstrin (28.04-28.97 > 22.23-23.80) içeren örneklerde % higroskopisite daha yüksek bulunmuştur [17]. Taşıyıcı olarak arabik gam ve peynir altı suyu protein izolatı karışımının kullanıldığı liyofilize bal çalışmasında % higroskopiklik 19.5-24.4 olarak belirlenmiştir [6]. Cantero vd. [7], elde ettikleri bal tozlarının % higroskopisite indekslerini 2.92-3.66 aralığında bulmuşlardır.



Şekil 1. Bal tozu örneklerinin higroskopik oranlarının zamanla değişimi. Büyük harfler aynı sürelerde örnekler arası farkı küçük harfler ise örneklerin farklı sürelerdeki farkını gösterir (P <0.05).

Şekil 2 incelendiğinde, peynir altı suyu protein izolatı içeren örneklerin daha higroskopik olduğu söylenebilir. Bu durum peynir altı suyu protein izolatının T_g değerinin (59-106 °C [28] maltodekstrinin T_g değerinden (112-180 °C [29] daha düşük olması ile açıklanabilir [26]. Duncan çoklu karşılaştırmalar sonucuna göre bal oranı değişimi ile higroskopi arasındaki ilişki istatistiksel olarak önemli değildir (P <0.05). %20'nin üzerinde higroskopi oranına sahip olan bal tozlarının çok higroskopik olarak değerlendirildiği Nurhad vd. [26]'nin çalışması baz alındığında, bütün örnek gruplarının % higroskopi oranlarının bu değerin altında olması bal tozlarının toz karakteristiğinin iyi olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. Bal tozu örneklerinin % higroskopi değerleri. Grafikte sütunlar üzerinde aynı harfle gösterilen örnekler arasında istatistik olarak fark bulunmamaktadır (P <0.05).

3.7 Geri kazanım (%)

Geri kazanım (%), püskürtmeli kurutmanın verimini belirlemede kullanılan önemli bir parametredir. Çünkü püskürtmeli kurutma esnasında kurutma çemberi, siklon gibi kurutma sistemi parçalarında ürün kayıpları olmakta ve verimi belirleyen ise örnek toplama haznesinde biriken ürün miktarı olmaktadır [3]. Liyofilizatörde ise böyle bir ürün kaybı yaşanmadığı için kurutma verimini kıyaslamak adına % geri kazanımdan ziyade kurutulan ürün ve taşıyıcı kitlesinin toplamından uzaklaştırılan su miktarının kıyaslanmasının daha doğru olacağı düşünülmektedir. Bu doğrultuda Tablo 5 incelendiğinde bal tozlarının geri kazanım oranının %85.31 ile %94.86 arasında olduğu görülmektedir. Bal ve taşıyıcı kitlesinden uzaklaştırılan su miktarı ise %5.14 ile %14.69 arasında değişmektedir. Besleme solüsyonundaki bal oranı arttıkça % geri kazanımın azaldığı, ancak bal ve taşıyıcı kitlesinden uzaklaştırılan % su miktarının arttığı görülmektedir. Bal ve taşıyıcı kitlesinden uzaklaştırılan su miktarı en yüksek olan örnek ise 60:40 bal:taşıyıcı içeren ve %40 katı konsantrasyonuna sahip olan örnek olmuştur. Taşıyıcı olarak arabik gam, peynir altı suyu protein izolatı ve maltodekstrinin kullanıldığı liyofilize bal üretimi üzerine yapılan bir çalışmada, geri kazanım oranları en yüksek maltodekstrin içeren örnekte görülmüş olmakla birlikte, bu oranlar %73.62-96.41 aralığında bulunmuştur [16]. Farklı botanik kökenli bal çeşitleri için dondurarak kurutma (bal:maltodelkstrin oranı 75:25; toplam katı konsantrasyonu %45) ile elde edilen bal tozlarının özelliklerinin kıyaslandığı başka bir çalışmada ise, % geri kazanım 96.60-99.89 aralığında belirlenmiştir [7]. Örnek gruplarının % geri kazanım oranları literatür ile uyumludur. Taşıyıcı olarak jelatin içeren örneklerin katı fraksiyonu su bağladığı için ağırlıkta azalma yerine artış gözlenmiştir. Dolayısıyla geri kazanım ve uzaklaştırılan su miktarı belirlenememiştir.

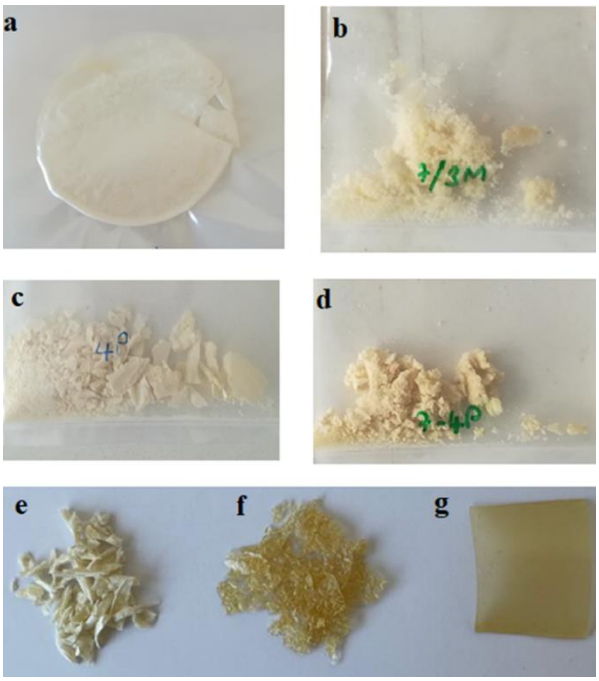
Tablo 5. Bal tozlarında kurutma verimi sonuçları

Örnek	% Geri kazanım	Bal ve taşıyıcı kitlesinden uzaklaştırılan % su miktarı
6/P20	94.86	5.14
6/P30	94.03	5.97
6/P40	85.31	14.69
6/M20	87.83	12.17
6/M30	89.34	10.66
6/M40	90.08	9.92
6/J20	*	*
6/J30	*	*
6/J40	*	*
7/P20	88.10	11.90
7/P30	88.15	11.85
7/P40	85.90	14.10
7/M20	87.57	12.43
7/M30	88.40	11.60
7/M40	87.20	12.80

* Saptanamadı.

3.8 Toz karakteristiği

Polimerik sistem olarak tanımlanan gıdalar amorf yapıdadırlar ve amorf yapıya sahip tozlar daha higroskopik ve yapışkan olup, akması ve dağılması zordur [5, 30]. Bu nedenle iyi toz karakteristiğin elde edilebilmesi için doğru formülasyonun geliştirilmesi önem teşkil etmektedir. Şekil 3a ve b'de görüldüğü gibi maltodekstrinli örneklerin bal içeriği yüzde 60'tan yüzde 70'e yükseldiğinde, toz ürünlerde daha fazla aglomerasyon gözlenmiştir. Peynir altı suyu protein izolatı içeren numuneler (Bk. Şekil 3c ve d) daha iyi toz ürün özellikleri göstermiştir. Bal oranı arttırılsa bile toz yapısı maltodekstrine göre daha iyi korunmuştur. Bu durum peynir altı suyu protein izolatının molekül ağırlığının (22 kDa) maltodekstrinden (937-2225 Da) daha yüksek olması ve dolayısıyla daha iyi taşıyıcı özelllik göstermesi ile açıklanabilir. Taşıyıcı ajan olarak jelatin içeren örneklerde ise toz yapı oluşturulamamıştır (Bk. Şekil 3e, f ve g). Kurutulacak solüsyonun kuru madde oranı arttıkça oluşan ürün parçalanamaz niteliğe dönüşmüş ve elastik formda bir film oluşturmuştur. Molekül ağırlığı peynir altı suyu protein izolatı ile benzer olan jelatin (18 kDa) ile bal tozu elde edilebilmesi için daha düşük oranlarda kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 3. %60 bal içeren maltodekstrinli örnek (a); %70 bal içeren maltodekstrinli örnek (b), %60 bal içeren peynir altı suyu proteinli örnek (c); %70 bal içeren peynir altı suyu proteinli örnek (d), %20 kuru madde oranına sahip jelatinli örnek (e); %30 kuru madde madde oranına sahip jelatinli örnek (f) ve %40 kuru madde oranına sahip jelatinli örnek (g).

4 Sonuçlar

Bal tozunun stabilitesi ve rekonstitüsyonu için düşük nem içeriği ve su aktivitesi değerlerinin yanı sıra iyi çözünürlük ve düşük higroskopisite özellikleri önem teşkil etmektedir. Yığın ve sıkıştırılmış yoğunluk gibi ürün özellikleri de paketleme hususları ve taşıma maliyetleri açısından önemlidir. Bütün bu parametreler besleme çözeltisinin özelliklerinden güçlü bir şekilde etkilenmektedir. Ayrıca tozun akıcılık ve çözünürlük gibi

teknolojik özellikleri, parçacık boyutu ve morfolojisi ile güçlü bir şekilde bağlantılıdır. Doğal olarak da farklı boyut ve morfolojideki taşıyıcılar toz ürüne farklı morfolojik ve teknolojik özellikler kazandırmaktadırlar.

Araştırmamızda elde ettiğimiz sonuçlara göre renk, su aktivitesi, nem, çözünürlük, higroskopi, HR ve CI parametreleri göz önünde bulundurulduğunda, her bir parametre için istenilen koşulların en iyi sağlandığı örnek grubunun; besleme çözeltisinin katı konsantrasyonunun (bal:taşıyıcı) %30 olduğu, bal:taşıyıcı oranının ise 60:40 olduğu ve taşıyıcı olarak maltodekstrinin kullanıldığı örnek grubu olduğu görülmüştür.

Bu çalışma ile dondurarak kurutma yöntemiyle salgı balı kategorisinde yer alan coğrafi işaretli meşe balı, başarılı bir şekilde toz forma dönüştürülmüştür. Elde edilen bu toz ürünün çeşitli formülasyonlarda kullanımı ile gıda endüstrisi için önemli bir alternatif sunacağı düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı tarafından finanse edilen ve Yüksek Öğretim Kurumu tarafından koordine edilen Bölgesel Kalkınma Odaklı Misyon Farklılaşması ve İhtisaslaşma Programı kapsamında Kırklareli Üniversitesi Gıda İhtisaslaşma Koordinatörlüğü tarafından BKOP_01 nolu proje ile desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 5

Kaynaklar

[1] M.S. Ngalimat, R.N.Z.R.A. Rahman, M.T. Yusof, A. Syahir, S. Sabri. Characterisation of bacteria isolated from the stingless bee, Heterotrigona itama, honey, bee bread and propolis. PeerJ, 7, e7478, 2019. https://doi.org/10.7717/peerj.7478

[2] N.M. Nedić, M. Gojak, I. Zlatanović, N. Rudonja, K.B. Lazarević, M.S. Drazić, K. Gligorević, M.B. Pajić. Study of vacuum and freeze drying of bee honey. Thermal Science, 24, 6, 4241-4251, 2020. https://doi.org/10.2298/TSCI200317194N

[3] Y. Suhag, G.A. Nayik, I.K. Karabagias, V. Nanda. Development and characterization of a nutritionally rich spray-dried honey powder. Foods, 10, 1, 162, 2021. https://doi.org/10.3390/foods10010162

[4] M. Sramek, B. Woerz, H. Horn, J. Weiss, R. Kohlus. Preparation of high-grade powders from honey–glucose syrup formulations by vacuum foam-drying method. Journal of Food Processing and Preservation, 40, 4, 790-797, 2016. https://doi.org/10.1111/jfpp.12660

[5] K. Samborska. Powdered honey–drying methods and parameters, types of carriers and drying aids, physicochemical properties and storage stability. Trends in food science & technology, 88, 133-142, 2019. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.03.019

[6] R.C. Rivero, D.A. Archaina, C.M. Busquet, B.M.B. Coronel, V.M. Busch. Development of a honey-based powder ingredient using a mixture design: Botanical origin effect and hydration properties. LWT, 147, 111446, 2021. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111446

[7] L. Cantero, L. González-Ceballos, S. Vallejos, G. Puertas, M.A. Fernández-Muiño, M.T. Sancho, S.M. Osés. Impact of the Drying Procedure and Botanical Origin on the Physico-Chemical and Potentially Bioactive Properties of Honey Powders. Foods, 12, 21, 3990, 2023. https://doi.org/10.3390/foods12213990

[8] Y. Suhag, V. Nanda. Optimisation of process parameters to develop nutritionally rich spray-dried honey powder with vitamin C content and antioxidant properties. International Journal of Food Science and Technology, 50, 8, 1771-1777, 2015. https://doi.org/10.1111/ijfs.12841

[9] S.M. Osés, L. Cantero, G. Puertas, M.Á. Fernández-Muiño, M.T. Sancho. Antioxidant, antimicrobial and anti-inflammatory activities of ling-heather honey powder obtained by different methods with several carriers. LWT, 159, 113235 2022. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113235

[10] A. Keke, I. Cinkmanis. α-Amylase Activity in Freeze-Dried and Spray-Dried Honey. Research for Rural Development, 35, 2020. DOI: 10.22616/rrd.26.2020.017

[11] C. Mutlu, A. Koç, M. Erbaş. Some physical properties and adsorption isotherms of vacuum-dried honey powder with different carrier materials. LWT, 134, 110166, 2020. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110166

[12] S.M. Osés, L. Cantero, M. Crespo, G. Puertas, L. González-Ceballos, S. Vallejos, M.Á. Fernández-Muiño, M.T. Sancho. Attributes of ling-heather honey powder obtained by different methods with several carriers. LWT, 150, 112063, 2021. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112063

[13] Y.H. Roos. Glass transition temperature and its relevance in food processing. Annual review of food science and technology, 1, 1, 469-496, 2010. https://doi.org/10.1146/annurev.food.102308.124139

[14] F. Fan, Y.H. Roos. Physicochemical properties, structural transformation, and relaxation time in strength analysis for honey powder models. Food research international, 122, 137-148, 2019. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.04.003

[15] K. Samborska, B. Bienkowska. Physicochemical properties of spray dried honey preparations. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, 575, 2013.

[16] H. Umesh Hebbar, N. Rastogi, R. Subramanian. Properties of dried and intermediate moisture honey products: A review. International Journal of Food Properties, 11, 4, 804-819, 2008. https://doi.org/10.1080/10942910701624736

[17] A.R. Jambrak, T.J. Mason, V. Lelas, L. Paniwnyk, Z. Herceg. Effect of ultrasound treatment on particle size and molecular weight of whey proteins. Journal of Food Engineering, 121, 15‑23, 2014. http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.08.012

[18] N. Castro, V. Durrieu, C. Raynaud, A. Rouilly. Influence of DE-value on the physicochemical properties ofmaltodextrin for melt extrusion processes. Carbohydrate Polymers, 144, 464–473, 2016. http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.03.004

[19] A. Saxena, K. Sachin, H.B. Bohidar, A.K. Verma. Effect of molecular weight heterogeneity on drug encapsulation efficiency of gelatin nano-particles. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 45, 42–48, 2005. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2005.07.005

[20] T.A. Ganaie, F. Masoodi, S.A. Rather, A. Gani. Exploiting maltodextrin and whey protein isolate macromolecules as carriers for the development of freeze dried honey powder. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, 2, 100040, 2021. https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100040

[21] D. Stagos, N. Soulitsiotis, C. Tsadila, S. Papaeconomou, C. Arvanitis, A. Ntontos, F. Karkanta, S. Adamou-Androulaki, K. Petrotos, D.A. Spandidos. Antibacterial and antioxidant activity of different types of honey derived from Mount Olympus in Greece. International journal of molecular medicine, 42, 2, 726-734, 2018. https://doi.org/10.3892/ijmm.2018.3656

[22] A. Keke, I. Cinkmanis. Comparison of individual phenolic compounds in freeze-dried and spray-dried honey powders. 187-191, 2022. UDC 638.162:547.56]:66.047.3

[23] AOAC, Official Methods of Analysis, (Moisture in Nuts and Nuts Products), Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC, USA. 1995.

[24] S. Santhalakshmy, S.J.D. Bosco, S. Francis, M. Sabeena. Effect of inlet temperature on physicochemical properties of spray-dried jamun fruit juice powder. Powder Technology, 274, 37-43, 2015. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.01.016

[25] N. Jinapong, M. Suphantharika, P. Jamnong. Production of instant soymilk powders by ultrafiltration, spray drying and fluidized bed agglomeration. Journal of food engineering, 84, 2, 194-205, 2008. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.04.032

[26] K. Samborska, E. Langa, A. Kamińska-Dwórznicka, D. Witrowa-Rajchert. The influence of sodium caseinate on the physical properties of spray-dried honey. International Journal of Food Science and Technology, 50, 1, 256-262, 2015. https://doi.org/10.1111/ijfs.12629

[27] L.N. Ikhsan, K.-Y. Chin, F. Ahmad. Methods of the dehydration process and its effect on the physicochemical properties of stingless bee honey: a review. Molecules, 27, 21, 7243, 2022. https://doi.org/10.3390/molecules27217243

[28] B. Nurhad, R. Andoyo, R. Indiarto. Study the properties of honey powder produced from spray drying and vacuum drying method. International Food Research Journal, 19, 3, 2012.

[29] Y.H. Chen, W.C. Chuah, F.Y. Chye. Effect of drying on physicochemical and functional properties of stingless bee honey. Journal of Food Processing and Preservation, 45, 4, e15328, 2021. https://doi.org/10.1111/jfpp.15328

[30] T. Tultabayeva, U. Chomanov, M. Tultabayev, A. Shoman, U. Zhumanova, R. Kasymbek, B. Tultebayev. Technology Improvement Obtaining Powdered Dried Honey. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 124, 11, 2023. 10.15587/1729-4061.2023.285447

[31] P. Schuck, E. Blanchard, A. Dolivet, S. Méjean, E. Onillon, R. Jeantet. Water activity and glass transition in dairy ingredients. Le Lait, 85, 4-5, 295-304, 2005. https://doi.org/10.1051/lait:2005020

[32] F. Avaltroni, P.-E. Bouquerand, V. Normand. Maltodextrin molecular weight distribution influence on the glass transition temperature and viscosity in aqueous solutions. Carbohydrate Polymers, 58, 3, 323-334, 2024. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2004.08.001

[33] P. Gabbott. A practical introduction to differential scanning calorimetry. Principles and applications of thermal analysis, 1-50, 2008. https://doi.org/10.1002/9780470697702

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 874-886
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
Araştırma makalesi / Research article
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Derin öğrenme tabanlı SNR kestirimi: Durum çalışması

Deep learning based SNR estimation: Case study

Merih Leblebici[1,*], Ali Çalhan[2]

[1] Düzce Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 81620, Düzce, Türkiye
[2] Düzce Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 81620, Düzce, Türkiye

Öz

Sinyal-gürültü oranı (signal to noise ratio, SNR) kestirimi, uyarlanabilir modülasyonu, etkili güç tahsisini ve güvenilir bağlantı uyarlamasını iyileştirdiği için kablosuz haberleşme sistemlerinin optimize edilmesinde önemli bir yere sahiptir. Veri yardımlı ve veri yardımsız olarak yapılan geleneksel SNR kestirim yöntemlerinin, yüksek frekans, geniş bant aralığı ve gürültüye karşı duyarlılığın fazla olması şeklinde karakterize edilen altıncı nesil (sixth generation, 6G) sistemlerinde yaşadıkları zorlukların aksine derin öğrenme (deep learning, DL) modelleri umut vaat eden bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada ResNet101V2, MobileNetV2 ve Xception olmak üzere üç adet DL modelinin SNR sınıflandırma performansı, modülasyon türlerine ait yıldız diyagramı görüntüleri yardımıyla öğrenme aktarımı tekniği kullanılarak değerlendirilmiştir. ResNet101V2, %70.8'lik bir ortalama sınıflandırma doğruluyla en üstün performansı gösterirken MobileNetV2 ve Xception sırasıyla %63.6 ve %56.8'lik doğruluk değerlerine ulaşabilmektedir. ResNet101V2, yüksek dereceli modülasyon türleri kullanılarak yapılan SNR sınıflandırmasında daha dayanıklı bir mimari olduğunu göstermiş olsa da MobileNetV2, kaynakları sınırlı senaryolar için alternatif olabilecek bir işlemsel yüke sahiptir. Tüm bunların aksine Xception, ImageNet veri setindeki görüntü sınıflandırma başarısına rağmen bu çalışmaya özgü olan SNR sınıflandırmasında aynı performansı gösterememektedir. Sonuçlar beklendiği üzere artan modülasyon derecesiyle beraber sınıflandırma doğruluğunun düştüğünü göstermektedir.

Anahtar kelimeler: SNR kestirimi, Kablosuz haberleşme, Derin öğrenme, Öğrenme aktarımı

Abstract

Signal-to-noise ratio (SNR) estimation plays a critical role in optimizing wireless communication systems by enabling adaptive modulation, efficient power allocation, and reliable link adaptation. Traditional SNR estimation methods, whether data-aided or data-assisted, face significant challenges in sixth generation (6G) systems due to their high frequency, wide bandwidth, and heightened sensitivity to noise. In response to these challenges, deep learning (DL) models have emerged as a promising alternative. This study evaluates the SNR classification performance of three DL models—ResNet101V2, MobileNetV2, and Xception—utilizing transfer learning with star diagram images representing modulation types. The results indicate that ResNet101V2 achieves the highest classification accuracy of 70.8%, demonstrating robustness in handling high-order modulation types. MobileNetV2 achieves an accuracy of 63.6%, offering a viable alternative for resource-constrained scenarios due to its computational efficiency. In contrast, Xception, despite its established success in image classification tasks such as those on the ImageNet dataset, performs poorly in SNR classification with an accuracy of 56.8%. This disparity underscores the specificity of SNR classification as a unique challenge distinct from general image classification tasks. Additionally, as expected, classification accuracy declines with increasing modulation order, reflecting the complexity of higher-order modulations.

Keywords: SNR estimation, Wireless communication, Deep learning, Transfer learning

1 Giriş

Sinyal-gürültü oranı (signal to noise ratio, SNR) kestirimi, kablosuz haberleşme sistem performanslarının optimize edilmesi için önemli bir işlemdir. SNR bilgisinin doğru bir şekilde elde edilmesi uyarlanabilir modülasyonu, etkin güç tahsisini ve güvenilir bağlantı uyarlamasını mümkün kılar. Altıncı nesil (sixth generation, 6G) teknolojisindeki güncel gelişmeler veri iletim hızının 938 Gbps (Gigabit per second, saniye başına Gigabit) değerlerine ulaşmasını sağlayarak beşinci nesil (fifth generation, 5G) ağlarındaki kapasitenin de üstüne çıkmıştır [1]. Benzeri görülmemiş bu veri hızları SNR kestiriminde yeni zorluklar meydana getirmektedir çünkü yüksek frekanslar ve bant genişlikleri gürültü ve girişime karşı olan hassasiyeti artırır. Geleneksel SNR kestirim yöntemleri bu durumlar altında zorluk yaşamakta ve 6G sistemlerinde güvenilir bir haberleşmenin sağlanabilmesi için yenilikçi yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Geleneksel SNR kestirim yöntemleri veri yardımlı olup olmamasına göre iki gruba ayrılabilir. Veri yardımlı SNR kestirim yönteminde iletilen veri ön bilgi olarak kullanılırken [2], veri yardımsız SNR kestirim yönteminde ise doğrudan alınan sinyal analiz edilerek SNR kestirilmeye çalışılır [3]. Ancak SNR kestirim yöntemleri sıklıkla iletim ortamının

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: merihleblebici@duzce.edu.tr (M. Leblebici)
Geliş / Received: 27.02.2025 Kabul / Accepted: 21.04.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1647805

doğrusal olmaması, çok yollu sönümleme, girişim ve gerçek zamanlı senaryolarla karakterize edilebilecek zorluklarla karşılaşabilir.

Derin öğrenme (deep learning, DL) modellerinin gelişmesiyle beraber çeşitli teknikler, sinyal ve modülasyon sınıflandırma [4–6] ile kanal kestirimi [7] gibi farklı alanlarda sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Güçlü özellik çıkarma yeteneği sayesinde DL modelleri SNR kestirimi problemi için de uygulanmış ve geleneksel yöntemlere göre kestirim performansının iyileştiği görülmüştür [8,9].

DL modellerinin gelişmesiyle beraber desen tanımlama ve özellik çıkarma gibi konularda büyük başarılar elde edilmiştir. Bu çalışmada DL modellerinin SNR kestirimindeki performansı yıldız diyagramlarından yararlanarak doğrudan ham sinyaller üzerinden elde edilen görüntülerle araştırılmaktadır. Böylelikle özelliklerin el ile ayarlanmasının ya da kanal modelleri hakkında geniş varsayımlarda bulunmanın önüne geçilmiş olunur.

Çalışmanın geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 2'de SNR kestirimi ile ilgili literatür taraması verilerek yapılacak katkı sunulmuştur. Bölüm 3'te literatüre yapılacak katkının nasıl olacağı açıklanmıştır. SNR kestirimi için önerilen modele ait simülasyon çıkarımları Bölüm 4'te yer alırken Bölüm 5'te çalışmanın sonucu ve potansiyel çalışma konuları verilmiştir.

2 İlgili çalışmalar

Yukarıda da belirtildiği üzere geleneksel SNR kestirim yöntemleri veri yardımlı ve veri yardımsız olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Veri yardımlı kestirimler, en küçük ortalama karesel hata (minimum mean square error, MMSE), en büyük olabilirlik (maximum likelihood, ML) ve karesel sinyal-gürültü varyansı (signal-to-noise variance, SNV) kestirimcileri olmak üzere iletilen veriye ait ön bilgiye ihtiyaç duymaktadır [10–12]. ML tabanlı SNR kestirimci ilk olarak [13]'teki çalışmayla toplamsal beyaz Gauss gürültüsü (additive white Gaussian noise, AWGN) içeren kanal için faz kaydırmalı anahtarlama (phase shift keying, PSK) modülasyon ailesinden ikili PSK (binary PSK, BPSK) türü kullanılarak önerilmiştir. İlk olarak Pauluzzi vd. [14] tarafından BPSK modülasyon türü için önerilen SNV tabanlı SNR kestirimci ise sonrasında daha yüksek modülasyon dereceleri için geliştirilmiştir.

Veri yardımı olmadan yapılan SNR kestirimlerinde ise herhangi bir ön bilgi sahibi olunmadan sadece alınan sinyal üzerinden kestirim işlemi gerçekleştirilir. İkinci ve dördüncü dereceden moment (second and fourth-order moment, M2M4) kestirim yöntemiyle bölünmüş sembol moment kestirimcisi (split-symbol moment estimator, SSME) ve sinyal-varyasyon oranı (signal-to-variation ratio, SVR) kestirimcisi veri yardımsız SNR kestirim yöntemlerine örnek olarak verilebilir [3,15,16]. AWGN kanalda BPSK için SSME SNR kestirimi ilk olarak [17]'de önerilmiştir. PSK modülasyon türleri için optimize edilen ve diğer modülasyon türleri için uygun olmayan SVR SNR kestirimcisi ise Brandão vd. tarafından AWGN kanal için önerilmiştir [18].

Geleneksel SNR kestirim yöntemlerinin bazı kısıtlarından dolayı performansları yeterli seviyede değildir. Örneğin bazı yöntemler sınırlı sayıda modülasyon türü için optimize edildiği için diğer modülasyon türlerine uygulanmak istendiği zaman performansları düşük kalmaktadır. Ayrıca bazı yöntemlerde düşük SNR seviyelerinin kestiriminde zorluklar yaşanmaktadır. Son olarak da tüm bu yöntemler alınan sinyalin mükemmel bir senkronizasyon içinde alındığını ve verici-alıcı arasında zaman ve faz kaymasının olmadığını varsaymaktadır ki bu varsayımların pratik senaryolar için geçerliliği mümkün değildir. Bunların önüne geçmek için ise DL tabanlı SNR kestirim yöntemleri önerilmiştir.

Mevcut DL tabanlı SNR kestirim yöntemleri genellikle eş fazlı ve karesel (in-phase and quadrature, IQ) değerlerinden oluşan sinyalleri kullanır. Örneğin Yang vd. [19] sinyalin IQ değerlerinin kullanıldığı basit bir evrişimli sinir ağı (convolutional neural network, CNN) tabanlı SNR kestirim yöntemi önermiş ve geleneksel yöntemlere göre daha iyi bir performansa sahip olduğunu göstermişlerdir. Ngo vd. [9] ise uzun vadeli evrim (long term evolution, LTE) ve 5G haberleşme sistemleri için CNN ile uzun kısa-süreli bellek (long short-term memory, LSTM) modellerinin birlikte kullanıldığı bir SNR kestirim yöntemi önermişlerdir. Bu yöntem, geleneksel yöntemlere göre daha iyi bir doğruluk değerine sahip olmasına rağmen çok az SNR aralığı için hazırlanmış bir veri seti üzerinden eğitilmiş olması dolayısıyla kısıtlı bir performans göstermektedir. Bir diğer çalışma olan [8]'de ise DL modeli, yıldız diyagramları ile beslenmiş ve iyi bir doğruluk değerine ulaşmıştır ancak bu çalışmada da sınırlı bir SNR aralığı dikkate alınmıştır.

Li vd. [20] çerçeve temelli bir SNR kestirim yöntemini araştırmışlardır. Bu yöntemde LSTM'nin yanında yinelemeli sinir ağlarından (recurrent neural network, RNN) da yararlanılmıştır. Bilişsel radyolar (cognitive radio, CR) için spektrumun izlenmesi büyük önem taşımaktadır. Boş olan bantlar, ikincil kullanıcıların kullanımı sırasında herhangi bir çakışma yaşamamaları için tespit edilmektedir. Jeevangi vd. [21] CR ağlarındaki spektrumun izlenmesi için DL tabanlı bir SNR kestirim yöntemi önermişlerdir. Zheng vd. [22] ise güç spektrumunun giriş olarak kullanıldığı DL tabanlı bir SNR kestirim tekniği üzerinde çalışmışlardır. Güç spektrumunu giriş olarak kullanmalarının işlemsel yükü azalttığını göstermişlerdir.

Chen vd. [23] DL ve kovaryans matrisini birleştiren bir SNR kestirim metodu önermişlerdir. Bu metotta kovaryans matrisi CNN'nin girişi olarak kullanılır. Yaptıkları karşılaştırmalarda önerilen metot, düşük ve orta SNR değerlerinde diğer modellere göre üstün bir performans sergilerken yüksek SNR değerlerinde diğerleriyle yaklaşık sonuçlar vermiştir. Bunu yaparken diğer DL tabanlı kestirim yöntemlerine göre daha düşük işlemsel karmaşıklığa sahip oldukları öne çıkmaktadır.

Xu vd. ise [24] klasik SNR kestirim tekniklerindeki düşük doğruluk değerlerini iyileştirmek için dikkat mekanizmaları ve LSTM'den yararlanarak yeni bir mimari önermişlerdir. Önerilen mimarinin diğerlerine göre performansının daha iyi olduğu gösterilmiştir. Son olarak Hu vd. [25] SNR kestirimi için güç spektrumundan yararlanan yeni bir DL modeli önermişlerdir. Önerilen model AWGN, Rayleigh ve Rician gibi kanal durumları için test edilmiş ve

diğer modellere göre yüksek SNR değerlerinde daha iyi bir performans sergilemiştir.

Bu çalışmada ise literatürden farklı olarak -20 dB ile 20 dB arasındaki geniş bir aralık için SNR kestirim modeli önerilmiştir. Bu SNR aralığındaki veri seti, IQ verilerinden yararlanılarak yıldız diyagramı görüntüleri şeklinde oluşturulmuştur. Veri seti içerisinde yer alan modülasyon türlerinin arasında dördün PSK (quadrature PSK, QPSK), 8PSK, 16PSK, 32PSK ile karesel genlik modülasyonu (quadrature amplitude modulation, QAM) modülasyon ailesinden QAM16, QAM64 ve QAM256 yer almaktadır. Bu modülasyon türlerine ait IQ görüntüleri üzerinden CNN tabanlı bir SNR kestirimi yapılmaktadır

3 Yöntem

Bu çalışma için üretilen veri seti yedi adet modülasyon türünü içermektedir. Her bir modülasyon türü, -20 dB ile 20 dB arasındaki SNR aralığını 5 dB aralıklarla kapsar. Her bir SNR değeri için 500 adet olmak üzere modülasyon türü başına 4500 adet görüntü düşmektedir. Eğitim sırasında her bir modülasyon türüne ait 4500 adet görüntü %80'i eğitim, %10'u doğrulama ve %10'u test verisi olarak ayrılmaktadır.

Veri setini oluşturacak modülasyon türleri QPSK, 8PSK, 16PSK, 32PSK, QAM16, QAM64 ve QAM256 olmak üzere seçilmiştir. Belirlenen SNR değeriyle üretilen AWGN, ilgili modülasyon türüne eklenir ve her bir modülasyon türüne ait görüntüler IQ değerlerinden oluşan yıldız diyagramlarını içerecek şekilde oluşturulur. Şekil 1'de veri setinde yer alan modülasyon türleri gösterilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen ve SNR kestirimi için kullanılan veri seti üzerinde sadece AWGN etkisi bulunurken sönümleme, frekans kayması vb. diğer bozucu etkiler dikkate alınmamıştır.

Tablo 1. DL modellerine ait katman yapıları

<table>
<tr><td colspan="3">Giriş Katmanı
(-, 512, 512, 3)
0</td></tr>
<tr><td colspan="3">Ölçekleme
(-, 512, 512, 3)
0</td></tr>
<tr><td>MobileNetV2
(-, 16, 16, 1280)
2257984</td><td>ResNet101V2
(-, 16, 16, 2048)
42626560</td><td>Xception
(-, 16, 16, 2048)
20861480</td></tr>
<tr><td>Düzleştirme
(-, 327680)
0</td><td colspan="2">Düzleştirme
(-, 524288)
0</td></tr>
<tr><td>Yoğun Katman
(-, 256)
83886336</td><td colspan="2">Yoğun Katman
(-, 256)
134217984</td></tr>
<tr><td colspan="3">dense_1 (Dense)
(None, 9)
2313</td></tr>
</table>

Performanslarını kanıtlamış mevcut DL mimarilerinden yararlanabilmek için öğrenme aktarımı (transfer learning) tekniği kullanılarak önceden ImageNet veri setiyle eğitilmiş modeller SNR sınıflandırma işlemi için seçilmiştir. Önceden eğitilmiş bu modellerin özellikle üst katmanları, öğrendikleri özellik çıkarma kabiliyetlerini muhafaza edebilmeleri için dondurulur. Daha sonra ise önerilen modele ait sınıflandırma katmanları SNR sınıflandırmasını yapmaları için eklenir. Böylelikle öğrenme aktarımı tekniği kullanılarak önerilen modeller, SNR sınıflandırması gibi özel görevlere kolaylıkla uyum sağlarken farklı veri setinden elde ettikleri ön bilgilerden de yararlanırlar.

Sahip oldukları derin hiyerarşik mimarilerinden dolayı görüntü sınıflandırma gibi görevler için uyumlu olan MobileNetV2, ResNet101V2 ve Xception modelleri bu çalışma kapsamında kullanılmıştır. Buna karar verilirken ilgili modellerin ImageNet veri seti üzerindeki Top-1 doğruluk değerlerine ve parametre sayılarına bakılarak düşük, orta ve yüksek performans gösteren modellerin seçilmesi sağlanmıştır. Öncelikle ilgili modellerin temel evrişim katmanları dondurulmuştur. Böylelikle dondurulan katmanlara ait ağırlıklarının eğitim sırasında güncellenmesinin önüne geçilir. Daha sonra modellere ait dondurulan katmanlar ile yoğun (dense) katmanlar birleştirilerek Tablo 1'de çıktı boyutları ve parametreleri gibi detayları verilen yeni bir model oluşturulur.

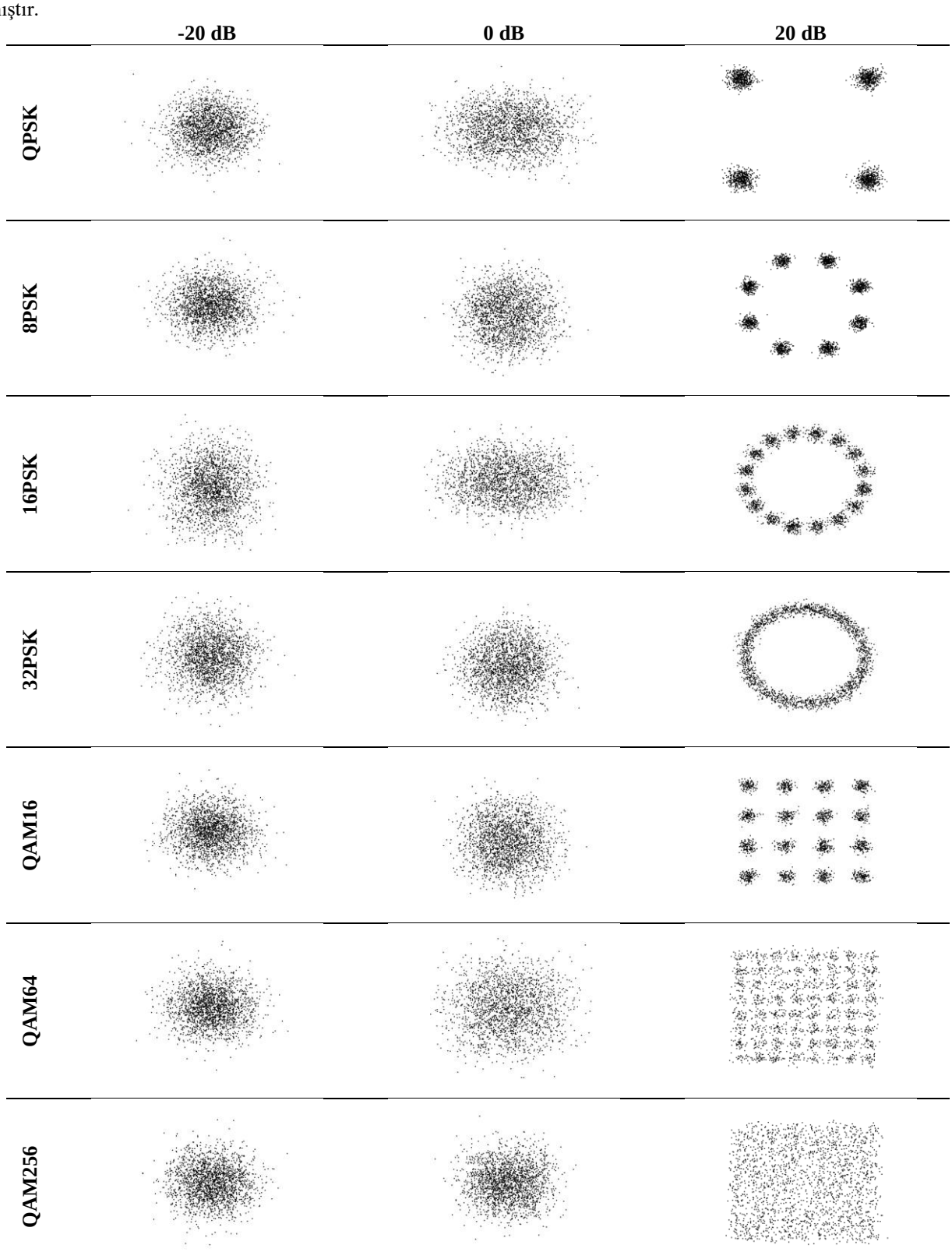
Öğrenme aktarımı kullanılarak önerilen sınıflandırma modelinin temel amacı hesaplama yükünü azaltmaktır. Bunun için MobileNetV2, ResNet101V2 ve Xception modellerine ait dondurulmuş katmanlara, bu katmanlara ait çıktılara göre görüntüleri sınıflandırmaya yarayan yoğun katmanlar dahil edilerek geliştirilmiştir. Tablo 1'de görüldüğü üzere görüntü verisine ait 0-255 arasındaki kırmızı, yeşil, mavi (red, green, blue, RGB) değerleri 0-1 arasında olacak şekilde yeniden ölçeklendirilir. Yeniden ölçeklendirilen veriler daha sonra ilgili modellerin dondurulmuş katmanlarını besler ve çıktıları düzleştirme işleminden geçirilir. Bunun arkasına yoğun katmanların dahil edilmesiyle verinin boyutu kademeli olarak azaltılır. Softmax aktivasyon fonksiyonuna sahip son yoğun katmanla beraber SNR değerlerine karşılık gelen olasılık değerleri çıktı olarak alınmış olur.

Yukarıda verilen modellerin seçilmesinin altında yatan sebepler için büyük ölçekli görüntüleri işlemedeki etkinlikleri, işlemsel verimlilikleri ve yüksek boyutlu özellik çıkarma yeterlilikleri söylenebilir. SNR sınıflandırmasındaki en iyi doğruluğu ve genelleştirilebilirliği sağlayan mimariyi belirlemek için modeller arasında karşılaştırmalı simülasyonlar yapılmıştır.

Tüm görüntüler, giriş formatını standart hale getirmek için bir ön işlemden geçer ve 512x512 piksel olacak şekilde tek bir boyuta ayarlanır. Eğitim aşaması, model performansını en iyi hale getirmek için titizlikle belirlenen hiperparametreler kullanılarak gerçekleştirilir. En fazla 50 dönem (epoch) sürecek şekilde ayarlanan eğitim süreci, doğrulama kaybı arka arkaya 5 dönem iyileşmediği takdirde erkenden durdurulur. Yığın boyutu (batch size) 16 olarak ayarlanmış ve veri artırma (data augmentation) ya da dropout (veri azaltma) teknikleri kullanılmamıştır. Modeli optimize etmek için kök ortalama karesel yayılımı (root mean squared propagation, RMSprop) ve kayıp fonksiyonu olarak da seyrek kategorik çapraz entropi (sparse categorical cross-entropy) tercih edilmiştir. Bu parametrelere karar verilmeden önce birçok farklı parametre üzerinden performans değerlendirmesi yapılmıştır. Bunların arasından optimum

sonucu verecek şekilde yukarıda bahsedilen parametreler ile modellerin sınıflandırma performansları elde edilmiştir. Bunu yaparken doğruluk değeri ve hesaplama yükü arasında bir ödünleşim gözetilerek en uygun parametrelerde karar kılınmıştır.

Veri artırma ve azaltma teknikleri, sınıflandırma modellerinde karşılaşılan yetersiz veri seti ve aşırı öğrenme sorunları için sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle veri artırma tekniği görüntü sınıflandırması için bir nevi gürültü eklemek



Şekil 1. Veri setinde yer alan modülasyon türleri

anlamına gelmektedir. Bu çalışmada parametrelere karar vermeden önce yapılan analizlerde her iki tekniğin de performansı ya değiştirmediği ya da düşürdüğü görülmüştür. Görüntüyü döndürme, çevirme vb. veri artırma teknikleri veri setimizdeki görüntülere uygulandığında düşük SNR değerlerindeki yüksek benzerlik oranları, görüntüleri artık tamamen ayırt edilemez hale getirmektedir. Bu nedenle çalışmamızda bu tekniklerden yararlanılmamıştır ancak gelecek çalışmalarda bunlara ait klasik tekniklerden başka, ilgilenilen probleme özel teknikler geliştirilebilir.

Eğitim aşamasındaki sayısal kararlılığı koruyabilmek için tüm görüntüler normalize edilmiştir ve tüm modeller önceden eğitilmiş ağırlıklar kullanılarak sürece başlamışlardır. Doğrulama kaybı, aşırı öğrenmeyi engellemek ve modelin yakınsayacağı optimum dönemi belirlemek için sürekli izlenmiştir. Modellerin performansları doğruluk değerleri, karışıklık matrisleri ve alıcı işlem karakteristik (receiver operating characteristic, ROC) eğrileri kullanılarak belirlenmiştir. Bu metrikler sınıflandırmanın performansını genel olarak analiz etmeye yararken farklı SNR değerleri ve modülasyon türleri boyunca yapılan kestirimlere ait çeşitli çıkarımlar yapmayı sağlamaktadır.

4 Simülasyon çıkarımları

Çalışma kapsamındaki simülasyonlar için Keras ve Tensorflow kütüphaneleri kullanılmıştır. Sınıflandırma modelleri çalıştırılırken Intel i7 13700KF merkezi işlem birimi (central processing unit, CPU), 32 GB rastgele erişimli bellek (random access memory, RAM) ve tek bir NVIDIA GeForce RTX 4070Ti grafik işlem birimi (graphics processing unit, GPU) gibi donanım ekipmanlarından yararlanılmıştır.

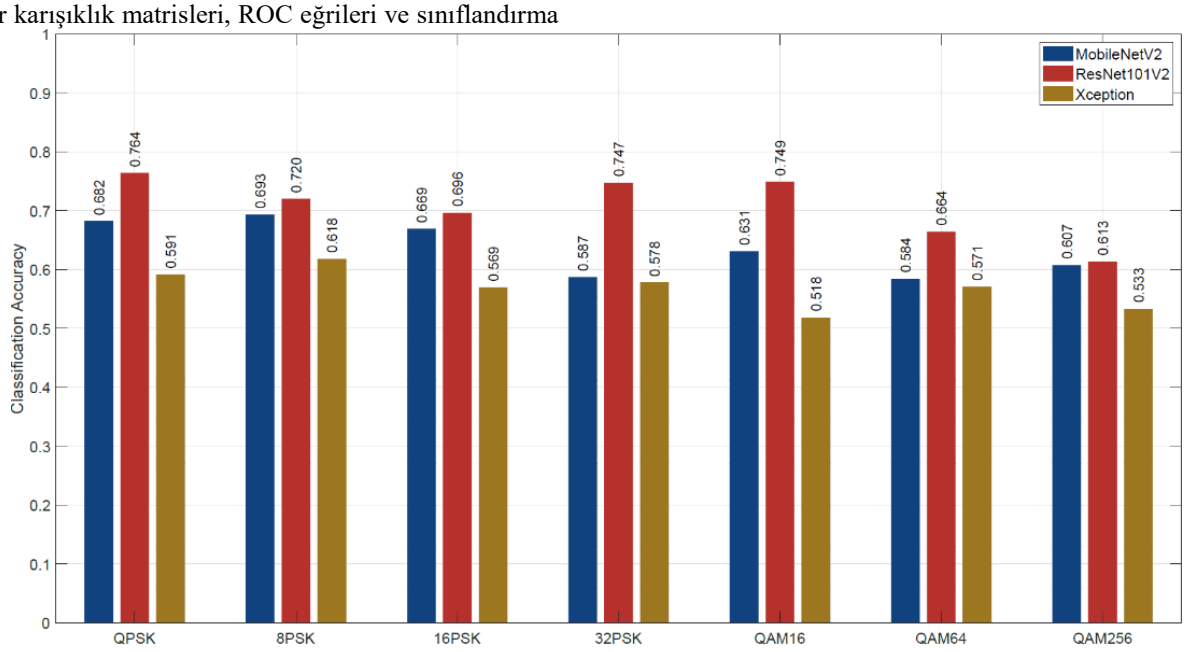
Yedi adet modülasyon türüne ait -20 ile 20 dB arasındaki SNR sınıflandırma performansı üç adet derin öğrenme modeli ile incelenmiştir. Bu incelemelerden elde edilen sonuçlar karışıklık matrisleri, ROC eğrileri ve sınıflandırma doğrulukları (classification accuracy) üzerinden karşılaştırılmıştır.

Şekil 2'de modülasyon türlerine göre SNR sınıflandırma doğrulukları gösterilmektedir. Her bir çubuk ilgili modülasyon türü için sınıflandırma modelinin ulaştığı doğruluk değerini ifade etmektedir.

ResNet101V2, en yüksek sınıflandırma doğruluklarını elde ederek tüm modülasyon türlerinde diğer iki modele karşı üstünlük sağlamıştır. Özellikle QPSK ve QAM16 modülasyon türlerinde ciddi bir avantaj sergilemektedir. MobileNetV2, ikinci en iyi sınıflandırma doğruluğuna sahiptir ve çoğu modülasyon türünde Xception'a göre daha iyi performans göstermektedir. Xception ise tüm modülasyon türlerinde en düşük doğruluk değerini elde ettiği için SNR sınıflandırma problemi için etkili bir model olmadığı anlaşılmaktadır.

QPSK ve QAM16 için elde edilen sınıflandırma doğrulukları 32PSK ve QAM256 gibi yüksek dereceli modülasyon türleri için elde edilen sınıflandırma doğruluklarından daha yüksektir. Bu eğilim, yüksek dereceli modülasyon türlerinin artan karmaşıklık ve azalan semboller arası mesafeden dolayı sınıflandırma problemleri için daha zorlayıcı olduğu genel beklentisi ile uyumludur. Yüksek dereceli modülasyon türleri için ResNet101V2, diğer modellere göre daha iyi performansa sahip olmaya devam etmekte ama özellikle çok zorlayıcı bir modülasyon türü olan QAM256 için aradaki fark ciddi ölçüde azalmaktadır.

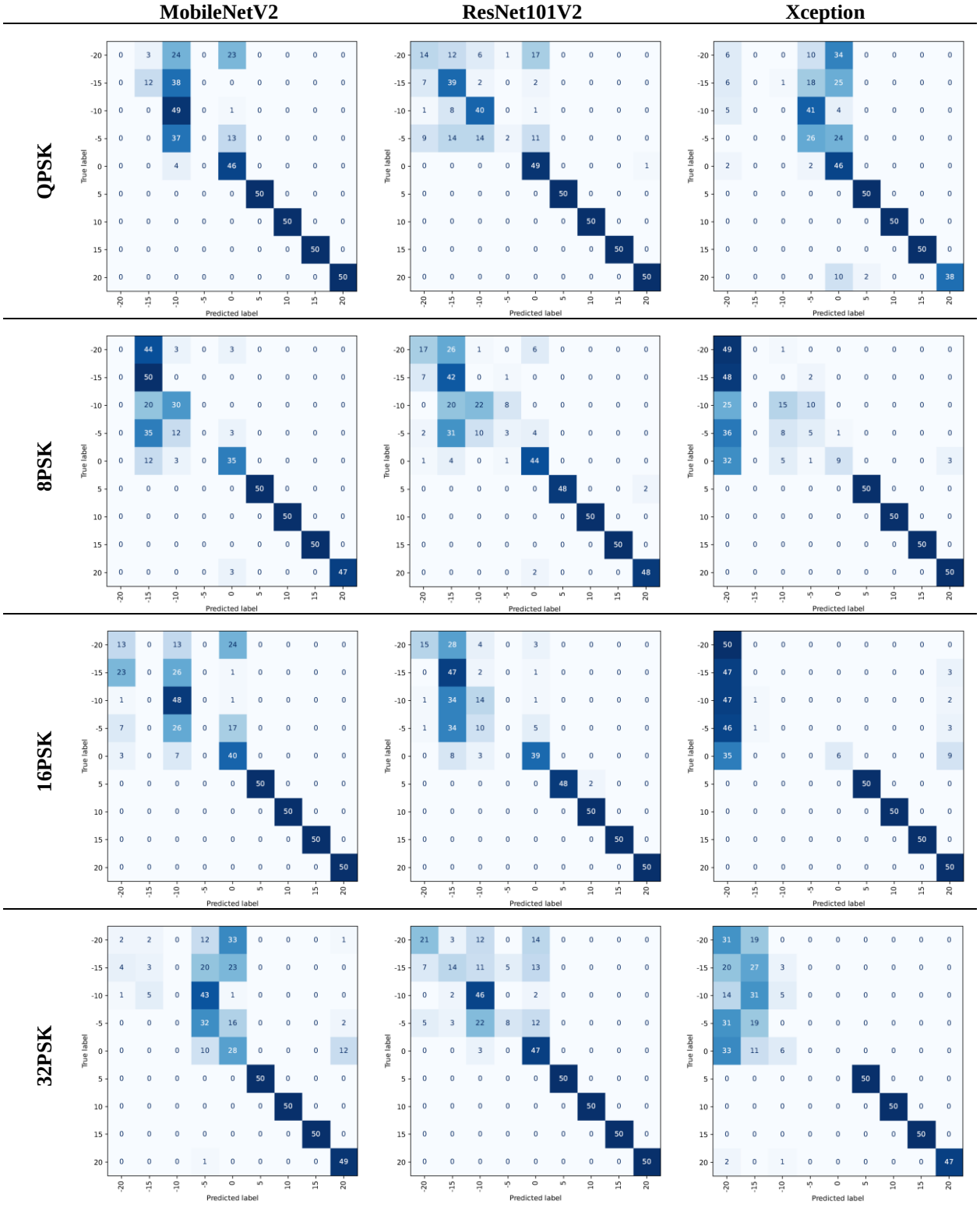
QPSK için ResNet101V2, %76.4 doğruluk değerine ulaşarak MobileNetV2 (%68.2) ve Xception (%59.1) modellerine göre üstün bir performans göstermektedir. En karmaşık modülasyon türü olan QAM256 için ResNet101V2, %61.3 doğruluk değerine ulaşırken MobileNetV2 ve Xception aradaki farkı kapatmasına rağmen geride kalmaya devam edip sırasıyla %60.7 ve %53.3 doğruluk değerlerine sahip olmaktadır.



Şekil 2. SNR sınıflandırma doğrulukları

Şekil 3'te PSK ailesi modülasyon türlerine ait karışıklık matrisleri verilmektedir. Her bir karışıklık matrisi, satırlarda yer alan asıl sınıflar (true label) ile sütunlarda yer alan tahmini sınıflar (predicted label) arasındaki ilişkiyi görselleştirmektedir. Matrislerdeki köşegen (diagonal) hücreler doğru tahminleri ifade etmektedir.

QPSK için MobileNetV2, özellikle 0'dan düşük SNR değerlerinden dolayı ortalama bir SNR sınıflandırma doğruluğu sergilemektedir. ResNet101V2, başarılı bir sınıflandırma performansı göstermektedir.



Şekil 3. PSK ailesi modülasyon türlerine ait karışıklık matrisleri

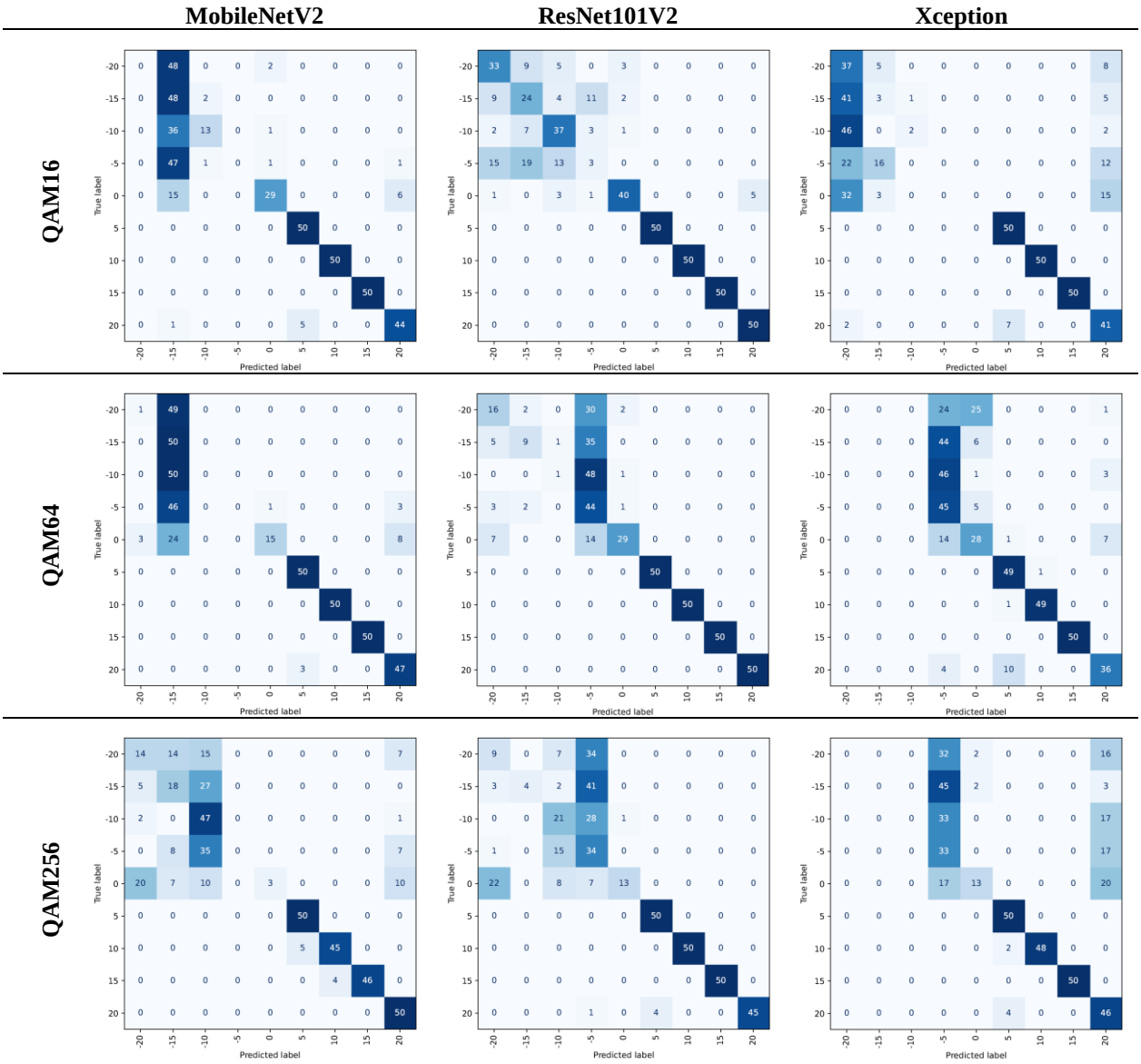
MobileNetV2'de %100 ve ona yakın değerlerdeki doğruluk oranlarında altı adet SNR değeri varken ResNet101V2'de bu sayı yediye çıkmaktadır. Xception ise diğer modellere göre kötü bir performansa sahiptir.

8PSK için MobileNetV2, QPSK'ya benzer bir sınıflandırma performansı göstermektedir. ResNet101V2'nin performansı üç modele göre en iyisiyken yine Xception en kötü sınıflandırma doğruluğuna sahip olmaktadır.

MobileNetV2 için yanlış sınıflandırma oranları 16PSK'da artmaktadır. Diğer modülasyon türlerine göre performansı düşse de ResNet101V2 diğer modellere göre hala üstün performans göstermektedir. Xception için ise düşük sınıflandırma oranları devam etmektedir.

32PSK modülasyon türüyle beraber MobileNetV2'nin performansı daha da düşmektedir. ResNet101V2 diğer modellere göre üstün bir performans göstermesine rağmen yanlış sınıflandırma oranlarının da arttığı gözden kaçmamalıdır. Xception ise en kötü performansı sergilemekte ve yüksek dereceli modülasyon türlerinde daha fazla zorluk çektiği görülmektedir.

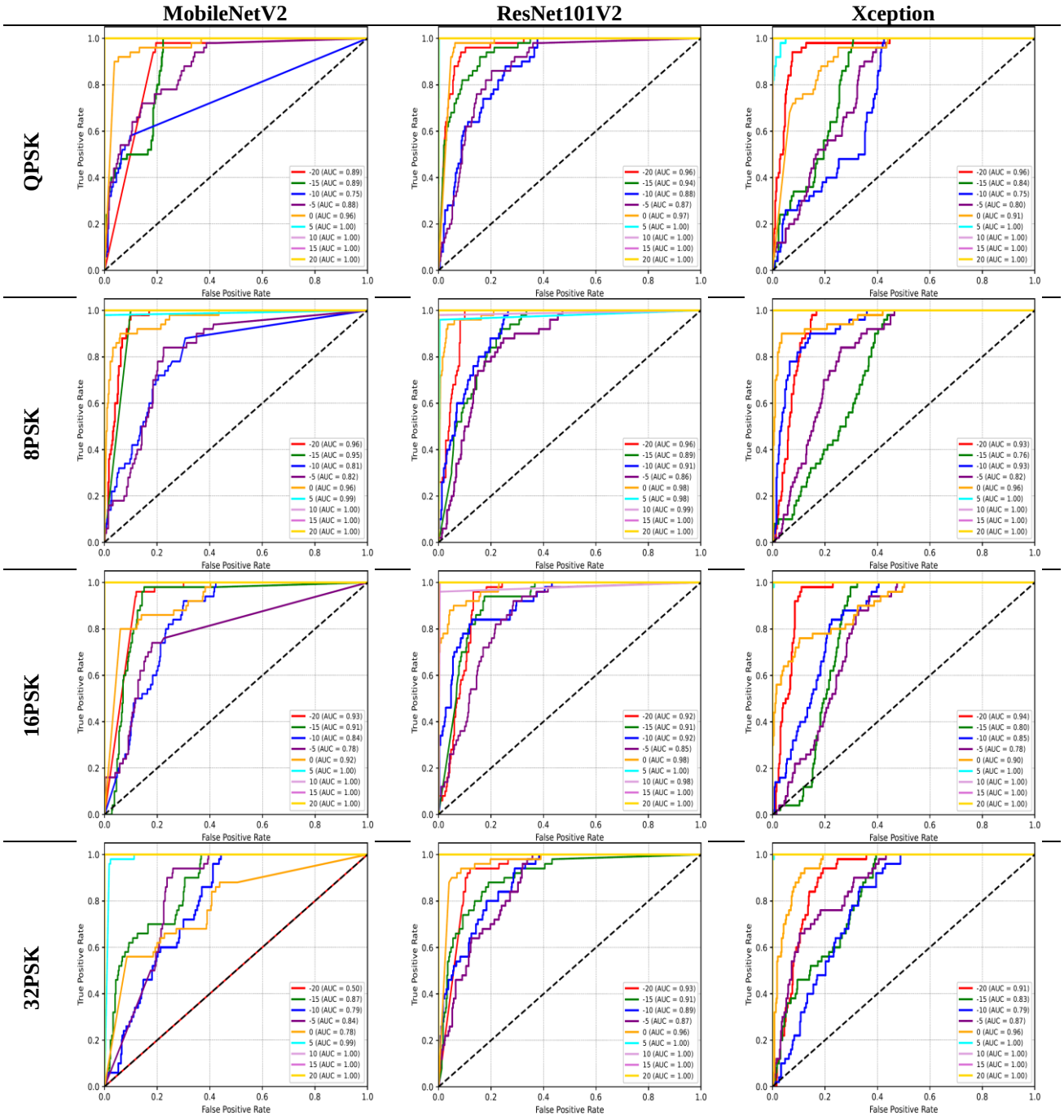
Şekil 4'te ise QAM ailesi modülasyon türlerine ait karışıklık matrisleri verilmektedir. PSK ailesinde olduğu gibi en iyi performansı ResNet101V2 gösterirken MobileNetV2 ortalama bir doğruluk değerine sahiptir. Xception ise en kötü performansı göstermeye devam etmektedir. Yine beklendiği gibi modülasyon derecesi arttıkça karmaşıklığın getirdiği sorunlar ortaya çıkmakta ve tüm modellerin performansı belli bir oranda düşmektedir.



Şekil 4. QAM ailesi modülasyon türlerine ait karışıklık matrisleri

Şekil 5'te PSK ailesine ait ROC eğrileri verilmektedir. Sınıflandırma modelleri karşılaştırılırken kullanılan bir başka metrik olan ROC eğrilerinin x ekseninde yanlış pozitif oran (false positive rate, FPR) yer alırken y ekseninde doğru pozitif oran (true positive rate, TPR) yer almaktadır. Eğri altındaki alan (area under the curve, AUC) ise ilgili modelin sınıfları ayırt etme kabiliyetini gösteren nicel bir ölçüm sunmaktadır. Bu ölçüm değeri ne kadar 1'e yakınsa yani eğrinin altında kalan alan ne kadar büyükse modelin o kadar iyi bir performansa sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Tüm modeller için QPSK modülasyon türünde, en fazla eğri üst-sol köşeye (iyi bir sınıflandırma performansının göstergesi) yaklaşarak en yüksek AUC değerlerini elde etmektedir. Bunların arasında da ResNet101V2, birbirine yakın eğrilerle beraber ideal noktaya en fazla yaklaşarak diğer modellere üstünlük kurmaktadır. Modülasyon dereceleri arttıkça ROC-AUC değerleri genel olarak azalmasına rağmen en iyi ve en kötü değerlere sırasıyla ResNet101V2 ve Xception sahip olurken MobileNetV2 ortalama bir değer kümesine sahip olmaktadır.

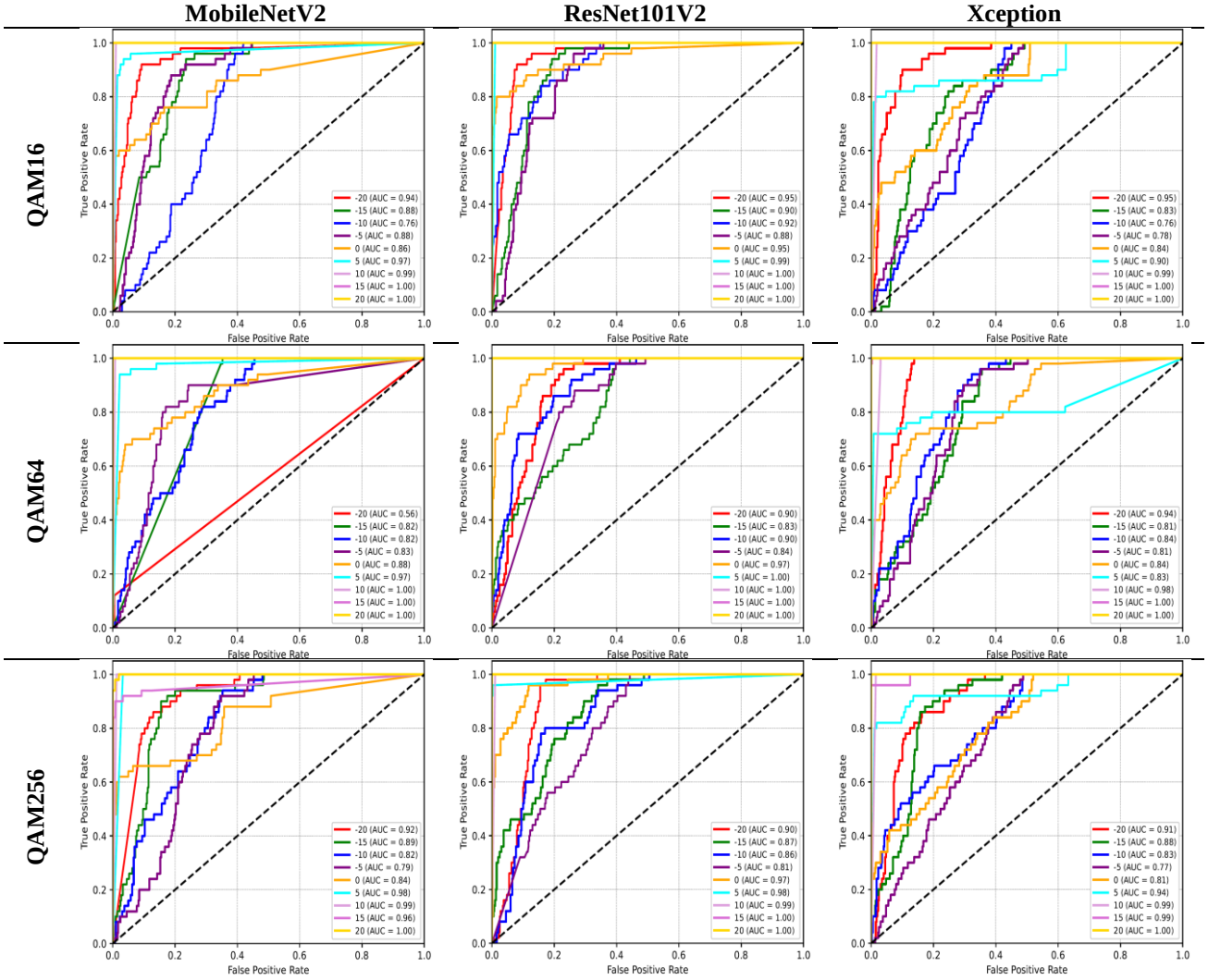


Şekil 5. PSK ailesi modülasyon türlerine ait ROC eğrileri

Şekil 6'da ise QAM ailesine ait ROC eğrileri verilmektedir. QAM16 için tüm modeller 1'e yakın en fazla AUC değerine sahip olarak iyi bir sınıflandırma performansı göstermektedir. Eğrilerin dikliğinin fazla olması ve ideal noktaya yakınlığı yüksek doğruluk değerini yansıtmaktadır. QAM64 ve QAM256 ile beraber sınıflandırma problemi daha zorlayıcı olmaktadır. Bundan dolayı da ROC eğrileri yayılmakta ve bazı SNR değerleri için daha düşük AUC değerlerine sahip olmaktadır. QAM256 özelinde ise sembollerin yakınlığı sınıflandırma problemini daha da zor hale getirmekte ve düşük SNR değerleri için ideal noktadan çok uzakta eğriler oluşmaktadır. Sınıflandırma modelleri arasındaki performans sıralaması ise tüm modülasyon türleri için iyiden kötüye doğru ResNet101V2, MobileNetV2 ve Xception olarak gerçekleşmektedir.

Tablo 2'de en yüksek doğruluk oranına sahip ResNet101V2'ye ait performans metrikleri gösterilmektedir. Doğruluk değerleri her bir modülasyon türüne ait SNR değerlerinin doğru sınıflandırma doğruluk oranlarını göstermektedir. Kesinlik (precision) değerinin yüksek olması modelin çok az yanlış pozitif (false positive, FP) değerlendirme yaptığını göstermektedir. Yüksek duyarlılık (recall) ise modelin çok az yanlış negatif (false negative, FN) değerlendirme yaptığı anlamına gelmektedir. F1 değeri de kesinlik ile duyarlılığın harmonik ortalamasını ifade eder ve yüksek değerlerde olması veri setinin dengeli dağıldığını ve modelin bir metriği diğerine göre üstün görmediğini belirtmektedir.

Modülasyon derecesi artıkça performansın kötüleştiği bu metriklerde de kendini göstermektedir. Bunun yanında 0 dB ve üstü SNR değerlerine ait kesinlik ve duyarlılık metrikleri yüksek ve birbirine yakındır. Bu durum kesinlik ve duyarlılık arasında iyi bir dengenin sağlandığını ve modelin ne çok korumacı ne de çok agresif bir tutum sergilediğini göstermektedir. Yani ortalama bir performans yakalamak için modelin doğru tespitler yapma pahasına FP kararları vermekten kaçınmadığını ifade etmektedir.



Şekil 6. QAM ailesi modülasyon türlerine ait ROC eğrileri

Tablo 2. ResNet101V2'ye ait performans metrikleri

		-20 dB	-15 dB	-10 dB	-5 dB	0 dB	5 dB	10 dB	15 dB	20 dB
QPSK	**Doğruluk**	0.88	0.90	0.93	0.89	0.93	1.00	1.00	1.00	1.00
	Kesinlik	0.45	0.53	0.65	0.67	0.61	1.00	1.00	1.00	0.98
	Duyarlılık	0.28	0.78	0.80	0.04	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00
	F1 Değeri	0.35	0.63	0.71	0.08	0.75	1.00	1.00	1.00	0.99
8PSK	**Doğruluk**	0.90	0.80	0.91	0.87	0.96	1.00	1.00	1.00	0.99
	Kesinlik	0.63	0.34	0.67	0.23	0.79	1.00	1.00	1.00	0.96
	Duyarlılık	0.34	0.84	0.44	0.06	0.88	0.96	1.00	1.00	0.96
	F1 Değeri	0.44	0.49	0.53	0.10	0.83	0.98	1.00	1.00	0.96
16PSK	**Doğruluk**	0.92	0.76	0.88	0.89	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00
	Kesinlik	0.88	0.31	0.42	NaN	0.80	1.00	0.96	1.00	1.00
	Duyarlılık	0.30	0.94	0.28	0.00	0.78	0.96	1.00	1.00	1.00
	F1 Değeri	0.45	0.47	0.34	0.00	0.79	0.98	0.98	1.00	1.00
32PSK	**Doğruluk**	0.91	0.90	0.88	0.90	0.90	1.00	1.00	1.00	1.00
	Kesinlik	0.64	0.64	0.49	0.62	0.53	1.00	1.00	1.00	1.00
	Duyarlılık	0.42	0.28	0.92	0.16	0.94	1.00	1.00	1.00	1.00
	F1 Değeri	0.51	0.39	0.64	0.25	0.68	1.00	1.00	1.00	1.00
QAM16	**Doğruluk**	0.90	0.86	0.92	0.86	0.96	1.00	1.00	1.00	0.99
	Kesinlik	0.55	0.41	0.60	0.17	0.87	1.00	1.00	1.00	0.91
	Duyarlılık	0.66	0.48	0.74	0.06	0.80	1.00	1.00	1.00	1.00
	F1 Değeri	0.60	0.44	0.66	0.09	0.83	1.00	1.00	1.00	0.95
QAM64	**Doğruluk**	0.89	0.90	0.89	0.70	0.94	1.00	1.00	1.00	1.00
	Kesinlik	0.52	0.69	0.50	0.26	0.88	1.00	1.00	1.00	1.00
	Duyarlılık	0.32	0.18	0.02	0.88	0.58	1.00	1.00	1.00	1.00
	F1 Değeri	0.40	0.29	0.04	0.40	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00
QAM256	**Doğruluk**	0.85	0.90	0.86	0.72	0.92	0.99	1.00	1.00	0.99
	Kesinlik	0.26	1.00	0.40	0.23	0.93	0.93	1.00	1.00	1.00
	Duyarlılık	0.18	0.08	0.42	0.68	0.26	1.00	1.00	1.00	0.90
	F1 Değeri	0.21	0.15	0.41	0.35	0.41	0.96	1.00	1.00	0.95

Üç model arasında gerçekleştirilecek olası bir ödünleşim durumunda Tablo 3'ten yararlanılabilir. Bu tabloda modellere ait mimari karakteristiklerin yansıtıldığı, MB cinsinden boyut, parametre sayısı ve derinlik ile performans değerlerini yansıtan ImageNet veri seti üzerindeki sınıflandırma doğruluğu ve yapılan çalışmaya özgü SNR sınıflandırma doğruluğu gibi bilgiler yer almaktadır.

MobileNetV2, boyut ve parametre sayısı bakımından en küçük model olması nedeniyle kaynakları kısıtlı cihazlarda kullanımı daha doğru olacaktır ancak bu sınırlı kapasitesi, performansının diğer büyük modellere göre düşük kalmasına yol açmaktadır.

ResNet101V2, MobileNetV2'ye göre boyut olarak oldukça büyük ve daha derin bir model olduğundan dolayı daha iyi özellik çıkarma yeteneğine sahiptir. Boyut ve parametre sayısı değerleri işlemsel karmaşıklık ile performans arasında bir ödünleşim yapmayı gerektirmektedir.

Xception ise boyut ve parametre sayısı bakımından MobileNetV2 ile ResNet101V2'nin arasında yer alıp orta düzeyde bir performansı makul olarak nitelendirilebilecek bir karmaşıklıkla sunmaktadır.

Xception, ImageNet veri seti üzerinde %79.0 ile en iyi doğruluk değerine ulaşırken onu %77.2 ile ResNet101V2 ve %71.3 ile MobileNetV2 takip etmektedir. Bu metrik, modellerin büyük ölçekli görüntü sınıflandırma problemlerinde gösterdikleri genelleştirme kapasitelerini yansıtmaktadır. Çalışma kapsamında belirlenen probleme bakıldığı zaman ise ResNet101V2'nin %70.8 ile en yüksek SNR sınıflandırma doğruluğuna ulaştığı görülmektedir. Bu sefer ResNet101V2'yi MobileNetV2 ve Xception sırasıyla %63.6 ve %56.8 doğruluk oranlarıyla takip etmektedir. Bu durum, Xception'ın ImageNet veri setinde iyi performans göstermesine rağmen sahip olduğu mimariden dolayı bu çalışmaya özgü belirlenen SNR sınıflandırma problemine etkili bir şekilde uyum sağlayamayarak başarılı olamadığını göstermektedir. Her iki durum için de iyi değerlendirilebilecek performans değerleriyle öne çıkan ResNet101V2'nin sahip olduğu derin yapıdan dolayı işlemsel karmaşıklığının fazla olacağı gözden kaçırılmaması gereken bir husustur.

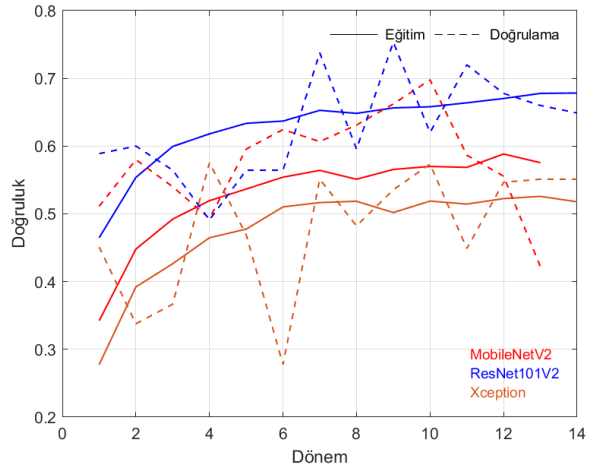
Öğrenme aktarımı yöntemiyle önerilen DL sınıflandırma modellerinin eğitim süreçleri aşırı öğrenme durumuna karşı

Tablo 3. Kullanılan modeller arasındaki ödünleşim tablosu

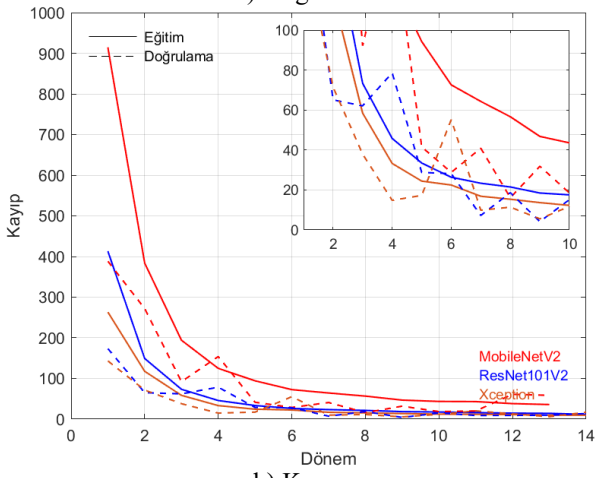
Model	Boyut (MB)	Parametre Sayısı	Derinlik	ImageNet Sınıflandırma Doğruluğu	SNR Sınıflandırma Doğruluğu (Ortalama)
MobileNetV2	**14**	**3.5 M**	105	%71.3	%63.6
ResNet101V2	171	44.7 M	205	%77.2	**%70.8**
Xception	88	22.9 M	**81**	**%79.0**	%56.8

dikkatli bir şekilde takip edilmiştir. Tablo 1'de değerleri verilen yoğun katmanların parametre sayıları oldukça yüksektir. Bu durum aşırı öğrenme ve hesaplama yükü gibi konularda ciddi zorluklar yaratabilir. Sınıflandırma katmanları kademeli olarak eklenerek nihayetinde sınıflandırılacak etiket sayısına kadar düşürülür. Bu eklenen katmanların sayısına bağlı olarak sondaki etiket sayısına yumuşak ya da sert bir geçiş yapılabilir. Yumuşak geçişte daha fazla katman eklenerek daha düşük parametre sayıları elde edilebilirken bu çalışmada tercih edilen sert geçişte daha az katman eklenerek yüksek parametre sayıları tercih edilmiştir. Böylelikle modelin derinliği ve parametre sayısı arasında bir ödünleşim yakalanmaya çalışılmıştır. Bu yapılırken yukarıda da bahsedildiği gibi eğitim süreci aşırı öğrenme durumuna karşı izlenmiştir.

Modelin eğitim süreci kayıp değerleri art arda 5 dönem iyileşmezse durdurulmuştur. Ayrıca Şekil 7'de QAM16 modülasyon türü için eğitim ve doğrulama setlerine ait doğruluk ve kayıp değerleri bulunmaktadır. Kayıp grafiklerine bakılacak olursa doğrulama setine ait değerlerin hızlı bir şekilde düşük değerlere yakınsadığı ve belli bir dönem dalgalandıktan sonra stabil hale geldiği görülmektedir.



a) Doğruluk



b) Kayıp

Şekil 7. QAM16 modülasyon türüne ait doğruluk ve kayıp değerleri

5 Sonuçlar

Bu çalışmada öğrenme aktarımı tekniği kullanılarak sınıflandırma konusundaki başarıları literatürde kanıtlanmış olan üç adet DL modelinin SNR sınıflandırma performansı çeşitli modülasyon türleri için araştırılmıştır. ResNet101V2, SNR sınıflandırma problemi için en etkili model olarak ortaya çıkmakta ve tüm modülasyon türlerinde MobileNetV2 ve Xception'ın önüne geçmektedir. Karışıklık matrislerinden de görülebileceği üzere ResNet101V2'nin köşegen hücrelerdeki üstünlüğü ve diğer modellere göre daha az yanlış sınıflandırma yapmış olması modelin dayanıklılığını göstermektedir. Bunun aksine MobileNetV2, daha az işlemsel yük gerektirmesine rağmen ortalama bir performans sergilemekte ve kaynakların sınırlı olduğu senaryolar için uygun bir seçenek olarak ortaya çıkmaktadır. Xception ise ImageNet veri seti kullanılarak gerçekleştirilen görüntü sınıflandırma probleminde göstermiş olduğu başarıya bu çalışmaya özgü olan modülasyon türlerinin görüntüleri kullanılarak yapılan SNR sınıflandırmasında ulaşamamıştır. Bundan dolayı mimari yapısının ilgili probleme göre tekrar uyarlanmasına ihtiyaç duymaktadır. Tüm modülasyon türlerinden elde edilen SNR sınıflandırma doğruluklarının ortalaması alındığı zaman en iyi performansın %70.8 ile ResNet101V2'ye ait olduğu görülebilir. Onu %63.6 ile MobileNetV2 takip ederken %56.8 ile de Xception'ın en kötü doğruluk oranını elde ettiği söylenebilir.

Tüm modeller için SNR sınıflandırma performansının modülasyon derecesinin yükselmesiyle beraber düştüğü görülmektedir. Bunun nedeni olarak semboller arası mesafenin azalması ve gürültüye karşı duyarlılığın artması söylenebilir. Gelecek çalışmalarda bu zorlukların üstesinden gelmek adına yüksek dereceli modülasyon türleri için veri artırma teknikleriyle beraber modellere ait hiperparametrelerin optimizasyonu üzerinde çalışılabilir. ResNet101V2, ileri öğrenme aktarımı teknikleri ve optimizasyon işlemleri için güçlü bir temel oluşturabilir. Ayrıca birçok yöntemin hibrit olarak kullanılması ve çeşitli optimizasyon işlemlerinin yapılması sınıflandırma performansını oldukça iyileştirecektir. Bunun yanında veri setimizin sadece AWGN etkisinde üretilmiş olması çalışmanın kısıtlarından biri olarak ortaya çıkmaktadır. Sönümleme, frekans kayması vb. bozucu etkilerle genişletilerek üretilecek bir veri seti bu kısıtı ortadan kaldıracak bir çalışma konusu olabilir.

Ayrıca çalışma kapsamında öğrenme aktarımı prensibiyle önerilen modeller kendi aralarında karşılaştırılmış olup literatürdeki diğer klasik ya da DL tabanlı SNR kestirim teknikleriyle herhangi bir karşılaştırma yapılmamıştır. Çalışmamıza ait bir diğer kısıt olarak görülebilecek bu hususa gelecek çalışmalarda değinilecektir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

[1] Z. Zhou, A. Kassem, J. Seddon, E. Sillekens, I. Darwazeh, P. Bayvel, Z. Liu, 938 Gb/s, 5–150 GHz ultra-wideband transmission over the air using combined electronic and photonic-assisted signal generation, Journal of Lightwave Technology, 42(20), 7247–7252, 2024. https://doi.org/10.1109/JLT.2024.3446827.

[2] H. Abeida, T. Y. Al-Nafouri, S. Al-Ghadhban, Data-aided SNR estimation in time-variant Rayleigh fading channels. In 2010 IEEE 11th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), IEEE, pp. 1–5, 2010. https://doi.org/10.1109/SPAWC.2010.5671005.

[3] R. Matzner, F. Englberger, An SNR estimation algorithm using fourth-order moments. In Proceedings of 1994 IEEE International Symposium on Information Theory, IEEE, pp. 119, 1994. https://doi.org/10.1109/ISIT.1994.394869.

[4] T. Xu, I. Darwazeh, Wavelet classification for non-cooperative non-orthogonal signal communications. In 2020 IEEE Globecom Workshops, GC Wkshps 2020-Proceedings, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 1-6, 2020. https://doi.org/10.1109/GCWkshps50303.2020.9367556.

[5] Y. Liu, H. Du, D. Niyato, J. Kang, Z. Xiong, D.I. Kim, A. Jamalipour, Deep generative model and its applications in efficient wireless network management: A tutorial and case study, IEEE Wireless Communications, pp. 199-207, 2024. https://doi.org/10.1109/MWC.009.2300165.

[6] H. Ye, L. Liang, G. Y. Li, B. H. Juang, Deep learning-based end-to-end wireless communication systems with conditional GANs as unknown channels, IEEE Transactions on Wireless Communications, 19(5), 3133–3143, 2020. https://doi.org/10.1109/TWC.2020.2970707.

[7] S. M. Aldossari, K. C. Chen, Machine learning for wireless communication channel modeling: An overview. Wireless Personal Communications, 106, 41–70, 2019. https://doi.org/10.1007/s11277-019-06275-4.

[8] X. Xie, S. Peng, X. Yang, Deep learning-based signal-to-noise ratio estimation using constellation diagrams, Mobile Information Systems 2020(1), 8840340, 2020. https://doi.org/10.1155/2020/8840340.

[9] T. Ngo, B. Kelley, P. Rad, Deep learning based prediction of signal-to-noise ratio (SNR) for LTE and 5G systems, In 2020 8th International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM), IEEE, pp. 1–6, 2020. https://doi.org/10.1109/WINCOM50532.2020.9272470.

[10] D. Athanasios, G. Kalivas, SNR estimation for low bit rate OFDM systems in AWGN channel, In International Conference on Networking, International Conference on Systems and International Conference on Mobile Communications and Learning Technologies (ICNICONSMCL'06), IEEE, pp. 198-198, 2006. https://doi.org/10.1109/ICNICONSMCL.2006.198.

[11] D. Guo, Y. Wu, S. Shamai, S. Verdú, Estimation in Gaussian noise: Properties of the minimum mean-square error, IEEE Transactions on Information Theory 57(4), 2371–2385 2011. https://doi.org/10.1109/TIT.2011.2111010.

[12] S.K. Tiwari, P.K. Upadhyay, Maximum likelihood estimation of SNR for diffusion-based molecular communication, IEEE Wireless Communications Letters 5(3), 320-323, 2016. https://doi.org/10.1109/LWC.2016.2553034.

[13] R. Gagliardi, C. Thomas, PCM data reliability monitoring through estimation of signal-to-noise ratio, IEEE Transactions on Communications 16(3), 479–486, 1968. https://doi.org/10.1109/TCOM.1968.1089851.

[14] D. R. Pauluzzi, N.C. Beaulieu, A comparison of SNR estimation techniques for the AWGN channel, IEEE Transactions on Communications 48(10), 1681–1691, 2000. https://doi.org/10.1109/26.871393.

[15] T. Salman, A. Badawy, T. M. Elfouly, T. Khattab, A. Mohamed, Non-data-aided SNR estimation for QPSK modulation in AWGN channel, In 2014 IEEE 10th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), IEEE, pp. 611-616, 2014. https://doi.org/10.1109/WiMOB.2014.6962233.

[16] B. Shah, S. Hinedi, The split symbol moments SNR estimator in narrow-band channels, IEEE transactions on aerospace and electronic systems, 26(5), 737-747, 1990. https://doi.org/10.1109/7.102709.

[17] M. K. Simon, A. Mileant, SNR estimation for the baseband assembly, The Telecommunications and Data Acquisition Report,1986.

[18] A. L. Brandao, L. B. Lopes, D. C. McLemon, In-service monitoring of multipath delay and cochannel interference for indoor mobile communication systems, In Proceedings of ICC/SUPERCOMM'94 - 1994 International Conference on Communications, IEEE, pp. 1458–1462, 1994. https://doi.org/10.1109/ICC.1994.368788.

[19] K. Yang, Z. Huang, X. Wang, F. Wang, An SNR estimation technique based on deep learning, Electronics, 8(10), 1139, 2019. https://doi.org/10.3390/electronics8101139.

[20] H. Li, D.L. Wang, X. Zhang, G. Gao, Frame-level signal-to-noise ratio estimation using deep learning, In Proceedings of the Annual Conference of the International Speech Communication Association, INTERSPEECH, International Speech Communication Association, pp. 4626–4630, 2020. https://doi.org/10.21437/Interspeech.2020-2475.

[21] S. Jeevangi, S. Jawaligi, V. Patil, Deep Learning-based SNR Estimation for Multistage Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks, Journal of Telecommunications and Information Technology, (4), 21–31, 2022. https://doi.org/10.26636/jtit.2022.164922.

[22] S. Zheng, S. Chen, T. Chen, Z. Yang, Z. Zhao, X. Yang, Deep Learning-Based SNR Estimation, IEEE Open Journal of the Communications Society, (5), 4778-4796, 2024. https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2024.3436640.

[23] S. Chen, S. Zheng, Z. Yang, T. Chen, Z. Zhao, X. Yang, Deep Learning-Based SNR Estimation with Covariance Input, In International Conference on Communication Technology Proceedings, ICCT, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 181–187, 2023 https://doi.org/10.1109/ICCT59356.2023.10419442.

[24] B. Xu, T. Ding, L. Guo, AC-BiLSTM: A Spatial Bidirectional LSTM with Multi-Head Self-Attention for SNR Estimation, In 2024 4th International Conference on Computer Systems, ICCS 2024, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 34–38, 2024. https://doi.org/10.1109/ICCS62594.2024.10795825.

[25] D. Hu, Y. Zhao, W.J. Xie, Q. Xiao, L. Li, A squeeze-and-excitation network for SNR estimation of communication signals, IET Communications, 19(1) 2025. https://doi.org/10.1049/cmu2.70006.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 887-898

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Orta yükseklikteki betonarme binalarda tuğla dolgu duvara bağlı yumuşak kat oluşumu

Soft story formation due to brick infill walls in mid-rise reinforced concrete buildings

Kayra Can Uçar[1,*], Emre Akın[2], İlker Fatih Kara[3]

[1,2,3] *Mersin Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 33110, Mersin Türkiye*

Öz

Bu çalışmada tuğla dolgu duvarlar eşdeğer basınç ve kayma çubukları olarak temsil edilerek, mevcut yönetmeliklere uygun tasarlanmış sekiz katlı betonarme yapıların modellerine dâhil edilmişlerdir. Bu modellerin doğrusal olmayan analiz sonuçlarına bağlı olarak tuğla duvarlar nedeniyle olası yumuşak kat oluşumu irdelenmiştir. Perde duvarsız ve iki farklı perde duvar yerleşimine sahip olacak şekilde (perde duvara bağlı üç grupta) tasarlanan yapılarda hiçbir katında tuğla duvar olmayacak, zemin kat haricindeki tüm katlarında tuğla duvar olacak ve tüm katları tuğla duvarlı olacak şekilde (tuğla duvara bağlı üç grupta) modelleme yapılmıştır. Dolayısıyla dokuz farklı gruptaki modellerin seçilen 11 farklı deprem ivme kaydı kullanılarak doğrusal olmayan dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları her bir modelde maksimum göreli kat öteleme oranlarının katlardaki dağılımları, kolonlardaki hasar durumları ve plastik mafsal dağılımlarına bakılarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmada ele alınan sekiz katlı, perde duvarsız veya perde duvarlı betonarme çerçeve sistem olarak mevcut yönetmeliklere uygun tasarlanmış modellerde, zemin katta tuğla dolgu duvarın bulunmamasına bağlı olarak plastik deformasyonlarda yığılma ve yumuşak kat oluşma ihtimali gözlenmemiştir.

Anahtar kelimeler: Betonarme, Deprem, Perde duvar Tuğla dolgu duvar, Yumuşak kat

Abstract

In this study, the infill walls were included in the models of eight story reinforced concrete structures by representing them as equivalent compression and shear struts. The probable formation of soft story deficiency was studied by considering the nonlinear analyses of these models. The structures which were designed to have no shear walls and two different shear walll configurations (in three groups according to the shear walls) were modeled as not to have any brick infill walls in all stories, to have infill walls at all stories except the ground story and to have infill walls at all stories (in three groups according to the infill walls). Therefore, the nonlinear dynamic analyses of the models in totally nine groups were conducted by using 11 selected earthquake records. The results of the analyses were assessed according to the distributions of the maximum inter-story drift ratios, the damage conditions of the columns and distributions of the plastic hinges. When evaluated in general, it was observed that no soft story were formed in any model or group. In the case of eight story reinforced concrete frame systems considered in this study with or without shear walls that were designed according to the current codes, no accumulation of plastic deformations and possible formation of soft story was observed at the ground story due to the absence of infill walls at this story.

Keywords: Reinforced concrete, Earthquake, Shear wall, Brick infill wall, Soft story

1 Giriş

Yumuşak kat, ülkemizde meydana gelen depremlerde yıkıma ve hasara en fazla sebebiyet veren düzensizlik durumlarından bir tanesidir. Yapılarda zemin katın ticari işletme ya da otopark olması durumlarında oluşabilmektedir. Bu binalarda dış cephelerde dolgu duvarlar bulunmamakta, iç cephede ise üst katlara oranla daha az dolgu duvar bulunmaktadır. Dolgu duvarlar, yanal yer değiştirmeler altında kolon ve kirişlerden gelen yükleri diyagonal olarak aktararak yapının yanal rijitliğini ve dayanımını büyük ölçüde arttırabilmektedir [1-4]. Artan yanal rijitliğin deprem sırasında yapıda ortaya çıkacak talepleri arttırabileceği açıktır. Öte yandan, bir yapının tasarımı sırasında tuğla dolgu duvarların sadece ağırlık etkileri dikkate alınmakta, bunun dışında yukarıda bahsedilen etkiler yok sayılmaktadır. Geçmiş birçok çalışma, tuğla dolgu duvarların özellikle yanal yükleme altında yapıya önemli etkileri olduğunu ve yapının deprem davranışını önemli biçimde değiştirebildiğini göstermiştir [5-17]. Bertero ve Brokken [7] yaptıkları çalışmada yapının tasarımı esnasında dolgu duvarların hesaplara dâhil edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Mehrabi ve diğerleri [9] dolgu duvarların deplasman kapasitesini sınırladığını ifade etmişlerdir. Negro ve Verzeletti [10] dolgu duvarların taşıma gücünü arttırdığını belirtmişlerdir. Cavaleri ve Di Trapani [13] yaptıkları çalışmada dolgu duvarların düzensiz dağılımının yapının davranışında olumsuz etki gösterebileceğini ifade etmişlerdir. Korkmaz ve Uçar [17] yaptıkları çalışmada en alt katta dolgu duvar bulunmaması durumunda sistemin rijitliği azaldığından dolayı deprem davranışına olumsuz

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ucarkayracan@gmail.com (K. C. Uçar)
Geliş / Received: 08.12.2024 Kabul / Accepted: 22.04.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1598349

etkisini dile getirmişlerdir. Deprem sırasında özellikle en çok kat kesme kuvvetine maruz kalan ilk katlarda bu elemanların bulunmaması, tasarım sırasında taşıyıcı sisteme etkilerinin de dikkate alınmadığı değerlendirildiğinde önemli problemler ortaya çıkartma potansiyeline sahiptir.

Yönetmelik şartlarına uygun tasarlanmış bir taşıyıcı sistemde, özellikle perde duvarların bulunması yanal rijitliği önemli mertebede arttırmakta, göreli kat ötelemelerini kısıtlamaktadır. Kısıtlanmış yanal yer değiştirmeler altında tuğla dolgu duvarların taşıyıcı sisteme yukarıda anlatılan etkileri daha düşük düzeyde kalabilir. Daha önce gerçekleştirilmiş olan ve beş katlı betonarme bir yapıyı ele alan bir çalışmada perde duvarların kesit alanları toplamının kat plan alanına oranının belli bir değerin üzerinde olduğu durumda tuğla duvarın zemin katta bulunmaması durumunda (açık zemin kat) oluşabilecek yumuşak kat riskinin önemli mertebede azaldığı ortaya konulmuştur [18]. Bu çalışma da benzer şekilde, ancak bu kez sekiz katlı bir betonarme bina için bu durumu irdelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018)'e göre [19] tasarımı yapılmış sekiz katlı bir betonarme yapıda zemin katta tuğla dolgu duvar eksikliğinden yaşanabilecek olası yumuşak kat oluşumu incelenmiştir. Bu durum perde duvarsız ve değişen perde duvar oranlarına sahip olan yapılar için ayrı ayrı ele alınmıştır.

Konuyla ilgili literatürde yer alan çalışmalar genellikle dolgu duvarları daha basit eşdeğer bir basınç çubuğu ile modellemekte veya mevcut, günün deprem yönetmeliği ve depreme dayanıklı tasarım şartlarını sağlamayan binalar üzerinde gerçekleştirilen analizleri içermektedir. Ayrıca yeni tasarlanan bir bina için perde duvar etkisiyle azalan göreli kat ötelemeleri altında dolgu duvar etkisinin ne mertebe değiştiğini irdeleyen ve dolgu duvarların mevcut çalışmadaki gibi modellendiği bir çalışmaya (Akın [18] haricinde) yazarlar tarafından rastlanmamıştır. Dolayısıyla bu çalışmadan elde edilecek sonuçlar ve bunların Akın [18] tarafından sunulan sonuçlarla karşılaştırmasının, tasarımda modellenerek dikkate alınmayan tuğla duvarların orta yüksekliğe sahip (5-10 kat) binalarda ortaya çıkarabileceği etkilerin ve yumuşak kat oluşturabilme potansiyelinin, perde duvarın etkisiyle birlikte ele alınarak yorumlanabilmesine katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir. Benzer çalışmaların gelecekte farklı parametrelerle ve dolgu duvarın daha iyi temsil edildiği modeller kullanılarak gerçekleştirilmesinin literatüre katkı sağlayacağı da söylenebilir.

2 Materyal ve metot

Bu çalışmadaki yapılar, 8 katlı betonarme konut binası olup, her kat 3 metre yüksekliğe sahiptir. Ayrıca bu yapılar, perde duvarsız (NSW), 2 perde duvarlı (SW-2) ve 4 perde duvarlı (SW-4) olarak tasarlanmışlardır. SW-2 grubunda yer alan perde duvarlar, Şekil 1'de plan görüntüsü sunulan NSW grubundaki yapının C02 ve C14 kolonlarının olduğu kısımlara yerleştirilmiştir. SW-4 grubunda yer alan perde duvarlar ise NSW grubundaki planda C01, C04, C13 ve C16 kolonlarının olduğu kısımlara yerleştirilmiştir. Perde duvarların yerleşimi x-doğrultusunda ve simetrik olarak yapılmıştır. SW-2 ve SW-4 gruplarında perde duvarların kesit alanının kat plan alanına oranı sırasıyla %0,36 ve %0.72 olarak seçilmiştir. NSW, SW-2 ve SW-4 gruplarının her birinde tuğla dolgu duvar bulunmayan (BF), zemin katta dolgu duvar bulunmayıp üst katlarda dolgu duvar bulunan (OGS) ve tüm katlarda dolgu duvar bulunan (FI) modeller kullanılmış ve böylelikle toplamda 9 adet model oluşturulmuştur.

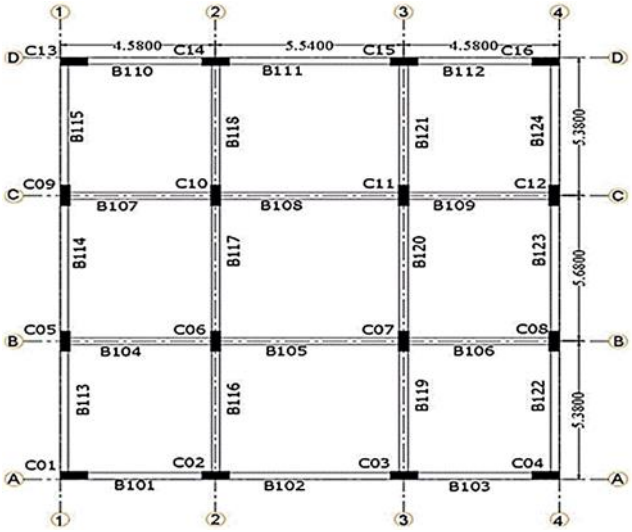
Bu modellerde, beton ve çelik donatı malzeme detayları deprem yönetmeliği hükümlerine uygun olarak seçilecek olup malzeme bilgileri ve değerleri Tablo 1'de gösterilmiştir.. Mander vd. (1998) [20] önerilen doğrusal olmayan beton modeli, Martinez-Rueda ve Elnashai (1997) [21] tarafından geliştirilen çevrimsel modelle uyumlu olarak deprem etkisi altında betonun doğrusal olmayan çevrimsel davranışını temsil etmek üzere kullanılacaktır. Betonun karakteristik basınç dayanımı (f_{ck}) 35 MPa seçilmiştir. Enine ve boyuna donatı karakteristik akma dayanımları (sırasıyla f_{ywk} ve f_{yk}) 420 MPa olarak belirlenmiştir. Bütün kiriş kesit boyutları 250x600 mm^2, bütün perde duvar kesit boyutları 250x1750 mm^2, bütün kolon kesit boyutları 300x800 mm^2 olacak şekilde seçilmiştir. Ayrıca perde duvar, kolon ve kirişlere ait donatı bilgileri Tablo 2'de verilmiştir. SW-2 ve SW-4 gruplarında yer alan perde duvarların tamamında aynı donatı detayı kullanılmıştır. Bütün perde duvarların uç kısımlarında 10Ø14, gövde kısımlarında ise 12Ø10'luk boyuna donatı kullanılmıştır. Enine donatılar ise uç kısımlarda Ø8/8 cm, gövde kısımlarda ise Ø8/16 cm olarak seçilmiştir. Döşeme kalınlığı 12 cm belirlenmiştir. Döşeme öz ağırlığına ilave ölü yük 1,5 kN/m^2, hareketli yük ise 2 kN/m^2 olacak şekilde kabul edilmiştir. NSW, SW-2 ve SW-4 grubundaki tüm kolonlarda boyuna donatılar 16Ø14, sıklaştırma bölgesinde yer alan enine donatılar ise Ø8/8 cm olarak tasarlanmıştır. Ayrıca enine donatılar bindirme boyunun olduğu orta bölgede ise Ø8/8 cm olarak belirlenmiştir. Kirişlerde enine donatılar mesnetlerde Ø8/9 cm, açıklık kısmında ise Ø8/20 cm olarak seçilmiştir.

Tablo 1. Beton ile çelik donatı bilgileri ve değerleri

Beton ile çelik donatı bilgileri	Değerler
Betonun karakteristik basınç dayanımı (f_{ck})	35 MPa
Enine ve boyuna donatı karakteristik akma dayanımları (sırasıyla f_{ywk} ve f_{yk})	420 MPa
Çelik için elastisite modülü (E_s)	$2x10^5$
Çelik pekleşme oranı	0.005
Beton için elastisite modülü (E_c)	33000 MPa

Tablo 2. Perde duvar, kolon ve kirişlere ait donatı bilgileri

Perde Duvar				**Kolon**				**Kiriş**
Uç Kısım		Gövde		Boyuna Donatı	Enine Donatı			Enine Donatı
Boyuna Donatı	Enine Donatı	Boyuna Donatı	Enine Donatı	16Ø14	Sıklaştırma Bölgesi	Orta Bölge	Mesnet	Açıklık
10Ø14	Ø8/8 cm	12Ø10	Ø8/16 cm		Ø8/8 cm	Ø8/8 cm	Ø8/9 cm	Ø8/20 cm



Şekil 1. NSW grubuna ait plan görünümü (boyutlar m cinsinden)

Çelik için elastisite modülü (E_s) $2x10^5$, pekleşme oranı 0.005 ve beton için ise elastisite modülü (E_c) 33000 MPa olacak şekilde belirlenmiştir.

Doğrusal olmayan yapı modellemesi SeismoStruct (2022) [22] yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Betonarme taşıyıcı sistem elemanları yayılı plastisite modeli kabul edilerek modellenmiştir. Bu modelde elemanlar en az dört integrasyon kesitine ayrılmış olup, her bir kesit 100~150 sonlu elemana bölünmüştür. Modellemede belirlenen mesnet donatıları kirişlerde ilk ve son integrasyon kesitlerine atanmıştır. İkinci ve üçüncü integrasyon kesitlerinde ise açıklık donatısı ile tanımlanmıştır.

2.1 Dolgu duvar modellemesi

Tuğla dolgu duvarlar x-ekseninde B1-B2, B3-B4, C1-C2, C3-C4, A2-A3, D2-D3 birleşimleri arasında kalan akslara yerleştirilmiştir. Bu elemanlar dış cephede 20 cm, iç cephede ise 10 cm kalınlıkta (t_{inf}) seçilmiştir. Özellikle geçtiğimiz yirmi-otuz yıl içerisinde dolgu duvarın taşıyıcı sistem davranışına etkilerini incelemek amacıyla çok fazla çalışma gerçekleştirilmiştir. Son dönemde Crisafulli F.J. (1997) [23] tarafından ortaya konulmuş olan bir model öne çıkmış ve bu modelleme SeismoStruct programında tanımlı olan iki adet eşdeğer basınç çubuğu ve basınç çubuklarının arasında (çekme etkisinde aktif olamayan) bir adet kayma çubuğu içeren tuğla dolgu duvar modeli kullanılarak yapılmıştır.

Bu çalışmada dolgu duvarın mekanik özelliklerini tanımlayabilmek için FEMA 356 (ASCE, 2000)'da [24] orta kalitede duvarlar için önerilen değerler esas alınmıştır. Dolgu duvara ait bu bilgiler ve değerler Tablo 3'de gösterilmiştir. Buna bağlı olarak dolgu duvarın basınç dayanımı (f'_m) 4.1 MPa, elastisite modülü (E_m) 2255 MPa ve kayma dayanımı ise 0.14 MPa olarak kabul edilmiştir. Dolgu duvarın diyagonal kapasitesini tanımlayabilmek için dört hasar türü tanımlanmış ve bunlardan en küçük değer veren dayanım dolgu duvarın diyagonal basınç dayanımı olarak dikkate alınmıştır. Bu hasar durumları için dayanımı sağlayan ifadeler Denklem (1-4)'de sırasıyla diyagonal çekme çatlağı, harç yüzeylerinde kayma çatlağı, köşelerin ezilmesi ve orta bölgede diyagonal çatlama için sunulmaktadır.

$$f_{m\theta} = [0.6\, f_{ws} + 0.3\, \sigma_v]/[b_w/d_w] \quad (1)$$

$$f_{m\theta} = [(1.2\ \sin\theta + 0.45\cos\theta)f_{wu} + 0.3\sigma_v] /[b_w/d_w] \quad (2)$$

$$f_{m\theta} = \left[1.12 f'_m \sin\theta\ \cos\theta\right] /[K_1(\lambda h)^{-0.12} + K_2(\lambda h)^{0.88}] \quad (3)$$

$$f_{m\theta} = \left[1.16 f'_m \tan\theta\right]/[K_1 + K_2 \times \lambda h] \quad (4)$$

Bu ifadelerde yer alan dolgu duvarın harç yüzeylerinin kayma dayanımı (f_{wu}) ve diyagonal basınç altındaki kayma dayanımı (f_{ws}) FEMA 356'da seçilen özelliklere bağlı olarak 0.14 MPa olarak kabul edilmiştir [24]. Dolgu duvar üzerinde düşey yükler dolayısıyla ortaya çıkabilecek olan düşey basınç gerilmesi (σ_v) hesaplara dâhil edilmemiştir. Denklem (1-2)'de yer alan d_w diyagonal doğrultudaki eşdeğer basınç çubuğunun uzunluğu, h kat yüksekliği, θ ise diyagonal eşdeğer basınç çubuğunun yatayla yaptığı açıdır. λ ifadesi Denklem (5) yardımıyla hesaplanabilir. b_w diyagonal doğrultudaki eşdeğer basınç çubuğunun etkili genişliği olup, hesabı için gerekli ifade Denklem (6)'da sunulmaktadır.

$$\lambda = \left[(E_m t_{inf} \sin 2\theta)/(4\, E_c I_c h_{inf})\right]^{0.25} \quad (5)$$

$$b_w = 0.175(\lambda h)^{-0.4} x\ d_w \quad (6)$$

Modelde maksimum dayanıma karşılık gelen birim deformasyon (ε_m) 0.001, nihai birim deformasyon (ε_{ult}) ise 0.010 olarak kabul edilmiştir. Modelde çatlakların kapanarak basınç gerilmesi oluşması durumuna karşı gelen kapanma birim deformasyonu (ε_{cl}), SeismoStruct (2022) [22] yazılımına ait açıklama dosyası tarafından önerildiği şekilde 0.004 olarak belirlenmiştir. t_{inf} ve h_{inf} sırasıyla tuğla dolgu duvarın kalınlığı ve yüksekliğidir. I_c ise kolonun eğilme doğrultusuna göre atalet momentidir. K_1 ve K_2 , λh değerlerine göre aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Denklem 7-9).

$$K_1 = 1.3 \; ve \; K_2 = -0.178 \;\; (\lambda h < 3.14) \tag{7}$$

$$K_1 = 0.707 \; ve \; K_2 = 0.01 \;\; (3.14 \leq \lambda h \leq 7.85) \tag{8}$$

$$K_1 = 0.47 \; ve \; K_2 = 0.04 \;\; (\lambda h > 7.85) \tag{9}$$

Kayma çubuğundaki aderans dayanımı (τ_o) Paulay ve Priestly (1992) [25] tarafından 0.1-1.5 MPa aralığında önerilmiştir. Kayma aderans dayanımı için FEMA 356 [24] tarafından önerilmiş olan ve yine bu aralıkta olan 0.14 MPa değeri seçilmiştir. Buna göre maksimum kayma dayanımı (τ_{max}) Denklem (10) kullanılarak 0.44 MPa olarak kabul edilmiştir. Öte yandan bu çalışmada Atkinson ve diğerlerinin (1989) [26] tavsiyesine göre sürtünme katsayısı (μ) 0.7 olarak belirlenmiştir.

$$\tau_{max} = \tau_0 + 0.30 \tag{10}$$

Tablo 3. Dolgu duvar bilgileri ve değerleri

Dolgu duvar model parametreleri	
Dolgu duvarın basınç dayanımı (f'_m)	4.1 MPa
Dolgu duvarın elastisite modülü (E_m)	2255MPa
Dolgu duvarın kayma dayanımı	0.14 MPa
Maksimum dayanıma karşılık gelen birim deformasyon (ε_m)	0.001
Nihai birim deformasyon (ε_{ult})	0.010
Kapanma birim deformasyonu (ε_{cl})	0.004
Kayma çubuğundaki aderans dayanımı (τ_o)	0.14 MPa
Maksimum kayma dayanımı (τ_{max})	0.44 MPa

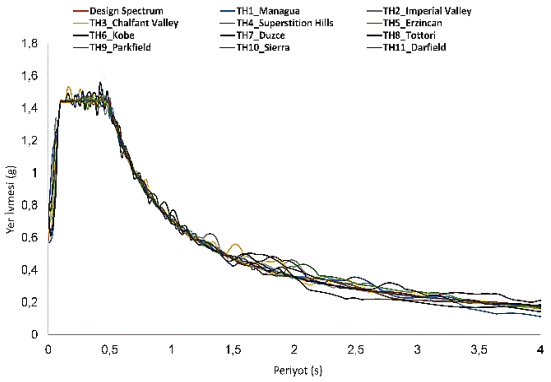
2.2 Analizler

Yapılan çalışmada yapı modellerine statik itme analizi ve zaman tanım alanında dinamik analiz uygulanmıştır. Ortogonal diğer yanal doğrultudaki yüklemelerin ortaya çıkartacağı etkileşimler sonuçların değerlendirmesine etki edeceğinden, yorumlamada sıkıntılara sebebiyet vermemesi adına sadece x-doğrultusunda analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca perde duvarlar ve dolgu duvarlar da analizlerin gerçekleştirildiği x-doğrultusunda yerleştirilmişlerdir. Zaman tanım alanında dinamik analiz için 11 adet deprem ivme kaydı kullanılmıştır. Bu deprem ivme kayıtları PEER-NGA-WEST 2 [27] veri tabanından alınmıştır. Deprem ivme kayıtları seçimi Tablo 4'de gösterilen deprem senaryosuna bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Bu senaryo, yapının Aydın ili Efeler ilçesinde ele alınan bir koordinatta bulunduğu kabulüyle, ilgili bölgenin deprem geçmişi ve fay özellikleri için Batı Anadolu Çöküntü Bölgesi'nin Paleosismoloji Projesi Sonuç Raporu [28] başlıklı çalışmadan yararlanılarak belirlenmiştir.

11 adet deprem ivme kaydı SeismoMatch [29] yazılımı yardımıyla yapı için seçilen konumda 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem için çıkartılmış olan tasarım spektrumuyla benzeştirilmiştir (Şekil 2). Bu işlem uyumsuzluk toleransı en fazla %30 olacak biçimde iki adımlı olarak (ilk adım 0.06-1.50 sn., ikinci adım ise 0.06-4.00 sn. aralığında) gerçekleştirilmiştir. Benzeştirilen 11 deprem ivme kaydıyla SeismoStruct (2022) [22] yazılımı kullanılarak 9 farklı yapı modelinin zaman tanım alanında dinamik analizleri yapılmıştır. Seçilen deprem ivme kayıtlarıyla ilgili detaylar Uçar (2024)'de sunulmaktadır [30].

Tablo 4. Deprem ivme kayıtlarının seçiminde kabul edilmiş parametreler

Parametre	Seçilen Aralık/Özellik
Fay Tipi	Doğrultu atımlı+Normal
Deprem Büyüklüğü	6.0-7.5
Kırılma Uzunluğu (R_{RUP}) (km)	0-30
Joyner-Boore Mesafesi (R_{JB}) (km)	0-50
Yüzeyde 30 m derinlikte kayma dalgası hızı	100-400



Şekil 2. Tasarım spektrumuna uyumlu hale getirilmiş deprem ivme kayıtları

3 Bulgular ve tartışma

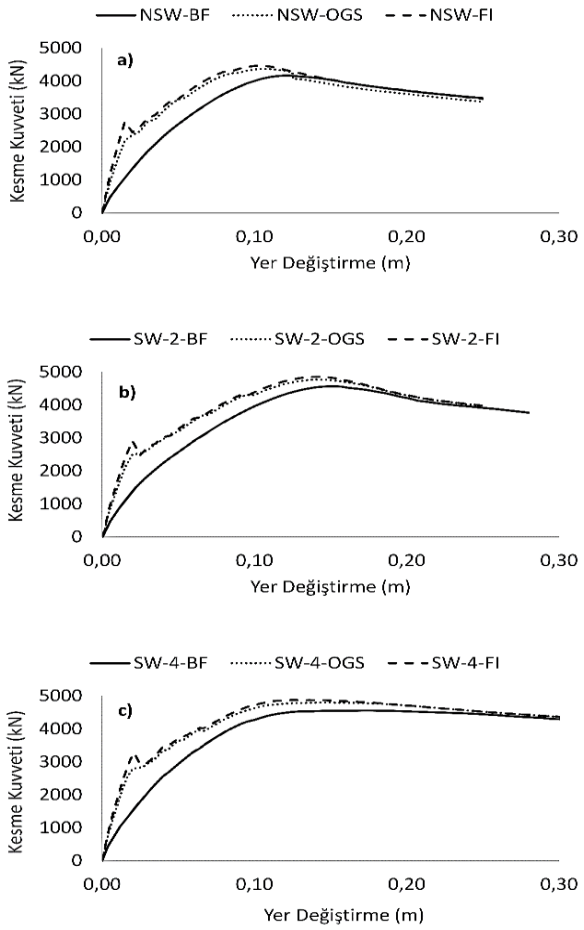
Yapı modellerine x ekseni boyunca statik itme ve zaman tanım alanında dinamik analizler yapılmıştır. Statik itme analizinden elde edilen kapasite eğrileri ve zaman tanım alanında dinamik analiz sonucunda elde edilen göreli kat öteleme oranlarının dağılımları, kolon betonun birim deformasyonuna bağlı hasar durumları ve plastik mafsal dağılımları incelenmiştir.

3.1 Statik itme analizi

Yapı modellerinin yanal yükleme altında kapasite eğrilerini elde etmek amacıyla x doğrultusunda doğrusal olmayan statik itme analizleri yapılmıştır. Bu analizler sonucu ortaya çıkan kapasite eğrileri Şekil 3'te gösterilmiştir.

Şekil 3 incelendiğinde en büyük taban kesme kuvveti SW-4-FI modelinde 4880 kN ile oluşmuştur. Perde duvarlı olup olmamasına bağlı olmaksızın tüm FI modellerde yanal davranışın elastik-ötesine geçilen sınır bölgesinde ani bir dayanım azalması olduğu ve bu noktadan sonra FI ve OGS modellere ait kapasite eğrilerinin birbirlerine özdeş hale geldikleri görülmektedir. Dayanımdaki bu ani düşüş, zemin kattaki tuğla duvarların kapasitesine erişip yanal davranışa katkılarının ortadan kalkmasına bağlanabilir. Tüm gruplardaki FI ve OGS modellerin başlangıç rijitliği BF modellere göre daha fazladır. Bu durum bu binalar için eklenen dolgu duvar modellerinin sağladığı rijitliğe bağlanabilir. NSW grubundaki FI ve OGS modellerin kapasite eğrileri maksimum kesme kuvvetine ulaştıktan hemen sonra BF modelin eğrisine yakınsamaktadır. Bu yakınsama SW-2 grubunda NSW'ye, SW-4 grubunda ise SW-2'ye kıyasla biraz daha geç aşamalarda olmuştur.

Bahsedilen yakınsamanın üst katlardaki dolgu duvar modellerinin kapasitelerine erişmelerine ve katkılarının sona ermesine bağlanabilir. Perde duvar ilavesiyle göreli kat ötelemelerinin azalması ve aynı noktada dolgu duvar modellerine gelen talebin azalması neticesinde bu yakınsamanın daha geç aşamalarda olduğu sonucuna varılabilir.



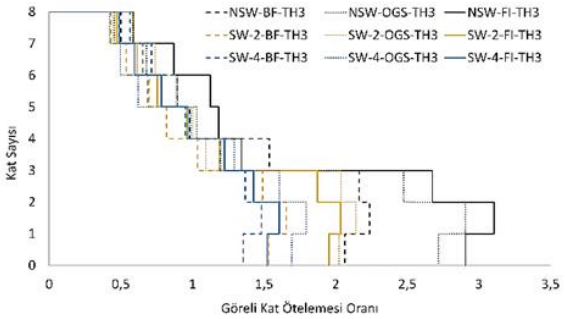
Şekil 3. (a) NSW (b) SW-2 (c) SW-4 gruplarına ait bütün modellerdeki kapasite eğrileri

3.2 Zaman tanım alanında dinamik analiz

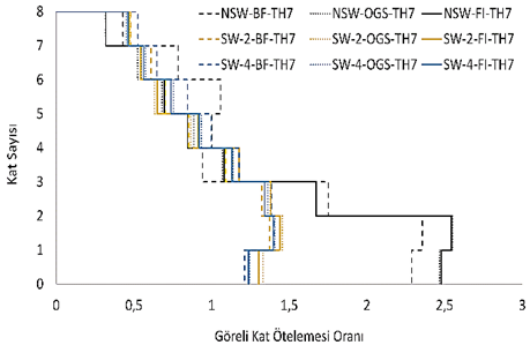
3.2.1 Göreli kat öteleme oranları

Zaman tanım alanında dinamik analiz sonucu yapı modellerine ait tüm katlardaki göreli kat ötelemelerinin kat yüksekliğine bölünmesi sonucu oluşan göreli kat öteleme oranlarının en büyük değerlerinin dağılımı Şekil 4 ve 5'te gösterilmiştir. Bu şekillerde NSW, SW-2 ve SW-4 gruplarına ait sadece TH3 ve TH7 deprem ivme kaydına ait veriler gösterilmiştir.

Uçar [30] tarafından gerçekleştirilmiş olan yüksek lisans tez çalışmasında diğer deprem ivme kayıtlarına ait sonuçlara ulaşılabilir. Bu sonuçlara göre BF, OGS ve FI modellerin hemen hemen tamamında en büyük göreli kat öteleme oranı zemin katın üzerindeki katlarda (çoğunlukla 1.katta) meydana gelmiştir. Akın [18] tarafından beş katlı bir bina için sunulan sonuçlardan farklı olarak, benzer 8-katlı yapıda kat sayısının artmasıyla değişen dinamik model karakteristiklerine bağlı olarak, en büyük göreli kat ötelemelerinin beklendiği gibi zemin katın üstündeki katlara kaydığı görülmektedir. Öte yandan (üst katlara göre daha küçük olsa da) zemin kat için bulunan değerler karşılaştırıldığında; NSW grubunda 8, SW-2 grubunda 5, SW-4 grubunda 4 deprem ivme kaydındaki en büyük göreli kat öteleme oranları, OGS modellerde karşılık gelen BF modellere kıyasla daha fazla olarak ortaya çıkmıştır. Bu durum dolgu duvarsız açık zemin kat nedeniyle, bu kattaki göreli kat ötelemelerinin artabildiğini, ancak perde duvar ilavesinin bu artışı kısıtladığını göstermektedir. Ayrıca Şekil 4 ve 5'de kısmen görünmekle birlikte, verilerin tamamı değerlendirildiğinde FI ve OGS modellerin tüm gruplarda BF modellere kıyasla birbirlerine daha yakın göreli kat öteleme davranışı ortaya koydukları söylenebilir. Özellikle ilk katlarda, büyük talepler altında belirli dolgu duvar modellerinin erken aşamalarda güç tükenmesi durumuna ulaşması neticesinde, zemin katın duvarsız ya da duvarlı olmasının sonuçlar üzerinde belirleyici bir unsur olmaktan çıktığı söylenebilir. Perde duvarların ilave edildiği SW-2 ve SW-4 grubunda NSW grubuna göre göreli kat öteleme oranlarının tüm katlarda sınırlandığı net bir şekilde görülmektedir. Ayrıca genel olarak perde duvar ilavesiyle, özellikle SW-4 olan gruptaki modellere ait göreli kat öteleme oranı profillerinin birbirine yakınsadığı söylenebilir.



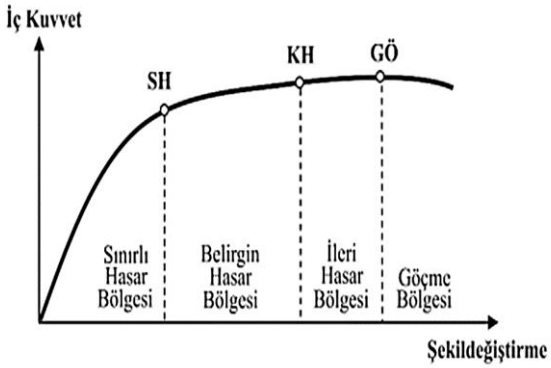
Şekil 3. NSW, SW-2 ve SW-4 gruplarına ait bütün modellerdeki TH3 deprem ivme kaydındaki göreli kat öteleme oranları (%)



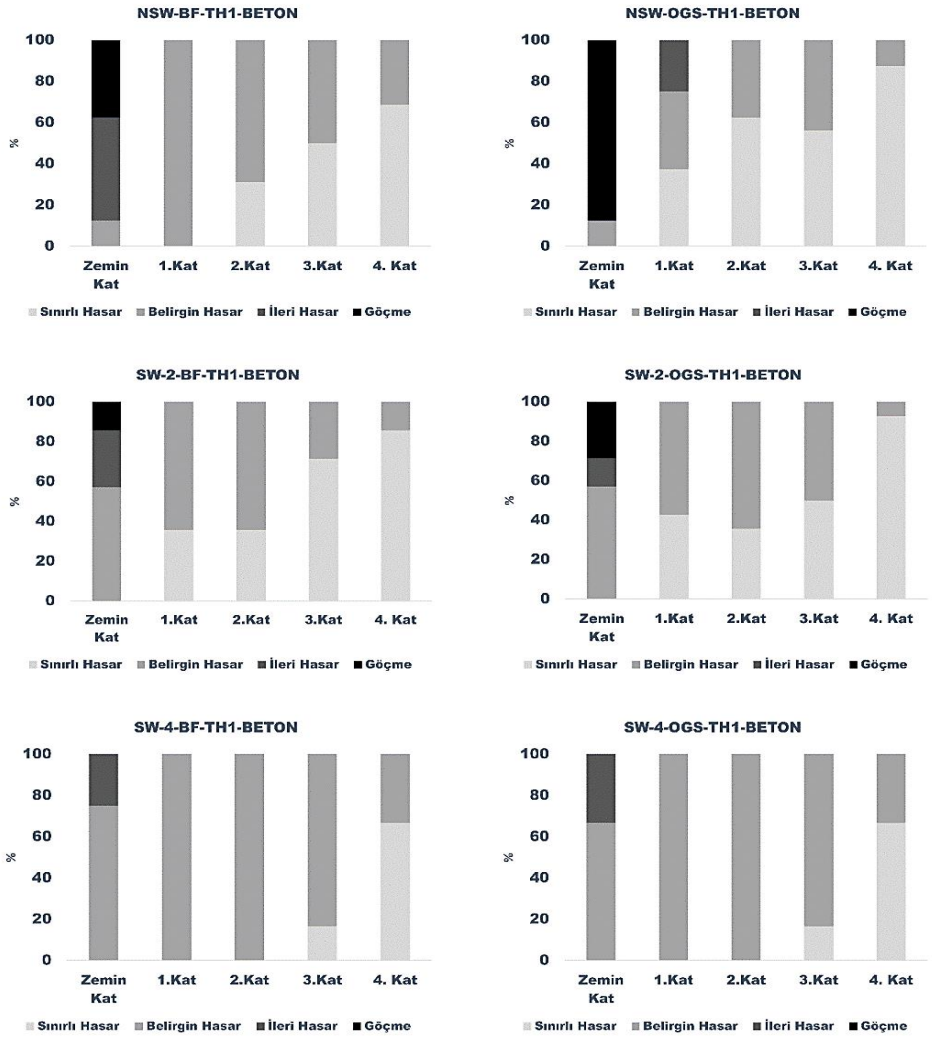
Şekil 5. NSW, SW-2 ve SW-4 gruplarına ait bütün modellerdeki TH7 deprem ivme kaydındaki göreli kat öteeme oranları (%)

3.2.2 *Kolon hasar durumu*

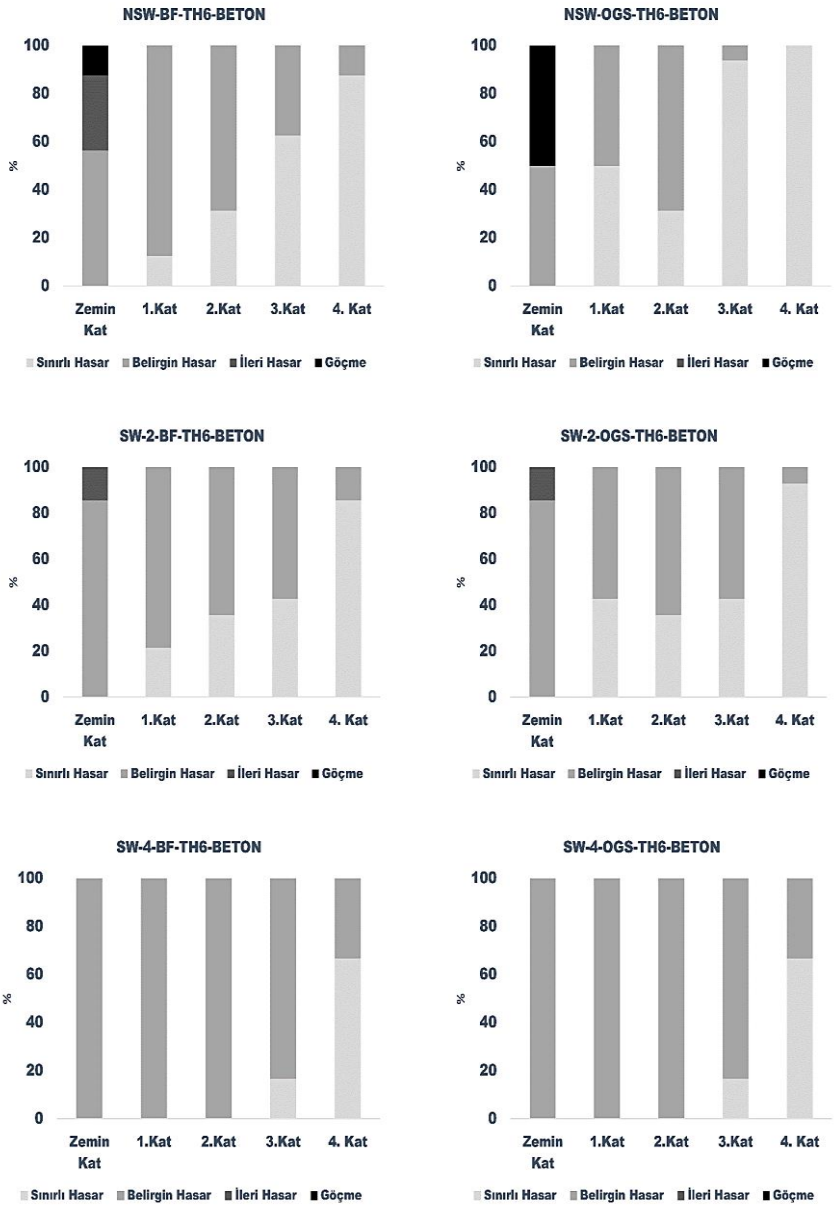
TBDY-2018'de [19] tanımlanmış olan hasar bölgeleri ve bunların sınırları Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu çalışmada kolonların sargılama bölgesindeki betonun birim kısalması için göçmenin önlenmesi (GÖ), kontrollü hasar (KH) ve sınırlı hasar (SH) bölgelerini belirleyen sınır birim deformasyon kapasite değerleri TBDY-2018'e uygun olarak tespit edilmiştir (GÖ, KH ve SH için sırasıyla 0.0117, 0.0088 ve 0.0025). Binanın ilk 5 katındaki kolonlarda uç bölgelerdeki maksimum beton birim kısalma talep değerleri bu kapasite değerleriyle karşılaştırılarak her bir kolonun hangi hasar bölgesinde olduğu belirlenmiştir. NSW, SW-2 ve SW-4 gruplarına ait TH1 ve TH6 deprem ivme kayıtlarındaki BF ile OGS modellere ait hasar bölgeleri kıyaslaması Şekil 7 ve 8'de gösterilmiştir. Uçar [30]'da tüm deprem ivme kayıtları için sunulan sonuçlara göre, perde duvarsız NSW grubunda 7, SW-2 ve SW-4 gruplarında ise 5'er analiz sonucunda OGS modeller karşılık gelen BF modellere göre daha fazla hasara sahip olarak ortaya çıkmıştır. Şekil 7 ve 8'de bu artış olan analiz sonuçları seçilerek gösterilmiştir. Bu şekillerde görülebileceği gibi, daha fazla oranda perde duvar eklenmesiyle zemin kat kolonlarında beton birim kısalmasına bağlı olarak OGS ve BF modeller arasında bahsedilen farkın kapanma eğiliminde olduğu söylenebilir. OGS ve BF modeller kendi içlerinde değerlendirildiklerinde, perde duvar ilavesiyle hasarın önemli mertebede azaldığını ve SW-4 grubunda GÖ hasar bölgesinde sadece belirli deprem ivme kayıtlarında oldukça az sayıda kolon bulunduğunu belirtmek gerekir.



Şekil 6. Hasar bölgeleri



Şekil 7. NSW, SW-2 ve SW-4 gruplarındaki BF ile OGS modele it TH1 deprem ivme kaydındaki bütün kolonların beton hasar bölgesi kıyaslaması

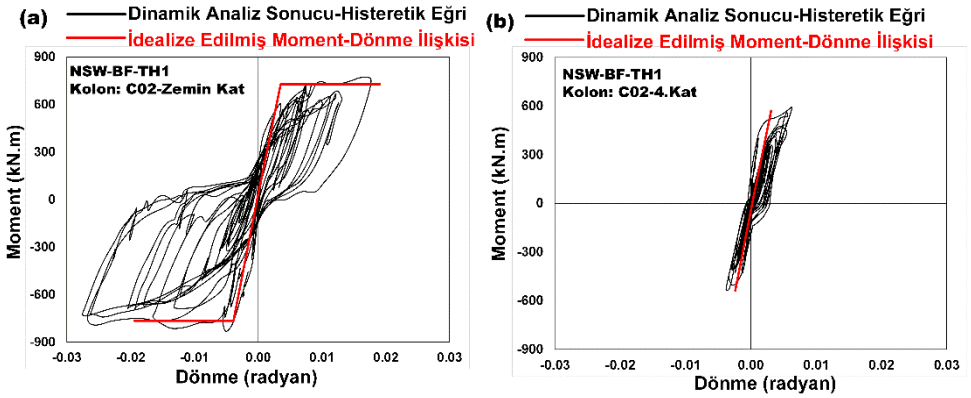


Şekil 4. NSW, SW-2 ve SW-4 gruplarındaki BF ile OGS modele ait TH6 deprem ivme kaydındaki bütün kolonların beton hasar bölgesi kıyaslaması

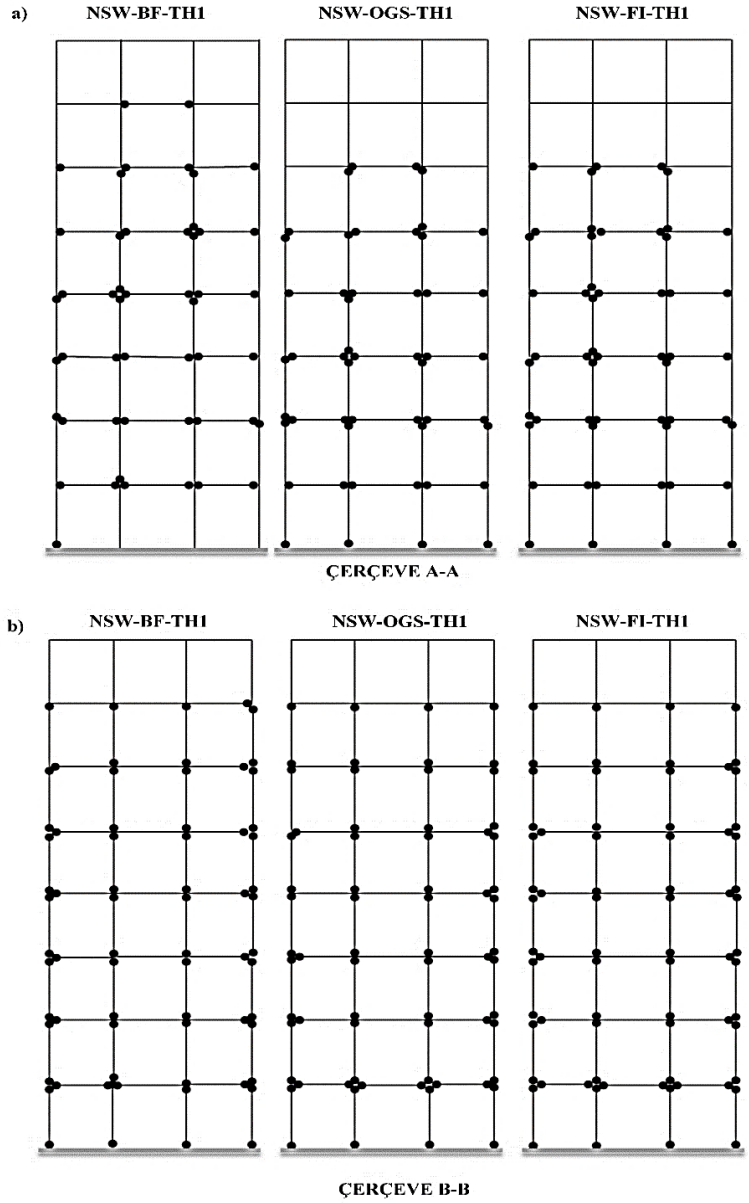
3.2.3 *Plastik mafsal dağılımları*

SeismoStruct (2022) [22] yazılımındaki moment-dönme histeretik eğrilerine bakılarak kolon ve kirişlerde plastik mafsalın oluşup oluşmadığına karar verilmiştir. Örnek olarak Şekil 9a'da verilen kolonda plastik mafsalın meydana geldiği, Şekil 9b'de ise kolonun elastik davranış gösterdiği görülmektedir. NSW, SW-2 ve SW-4 gruplarına ait TH1 deprem ivme kaydındaki plastik mafsal oluşumları Şekil 10-12'de gösterilmiştir.

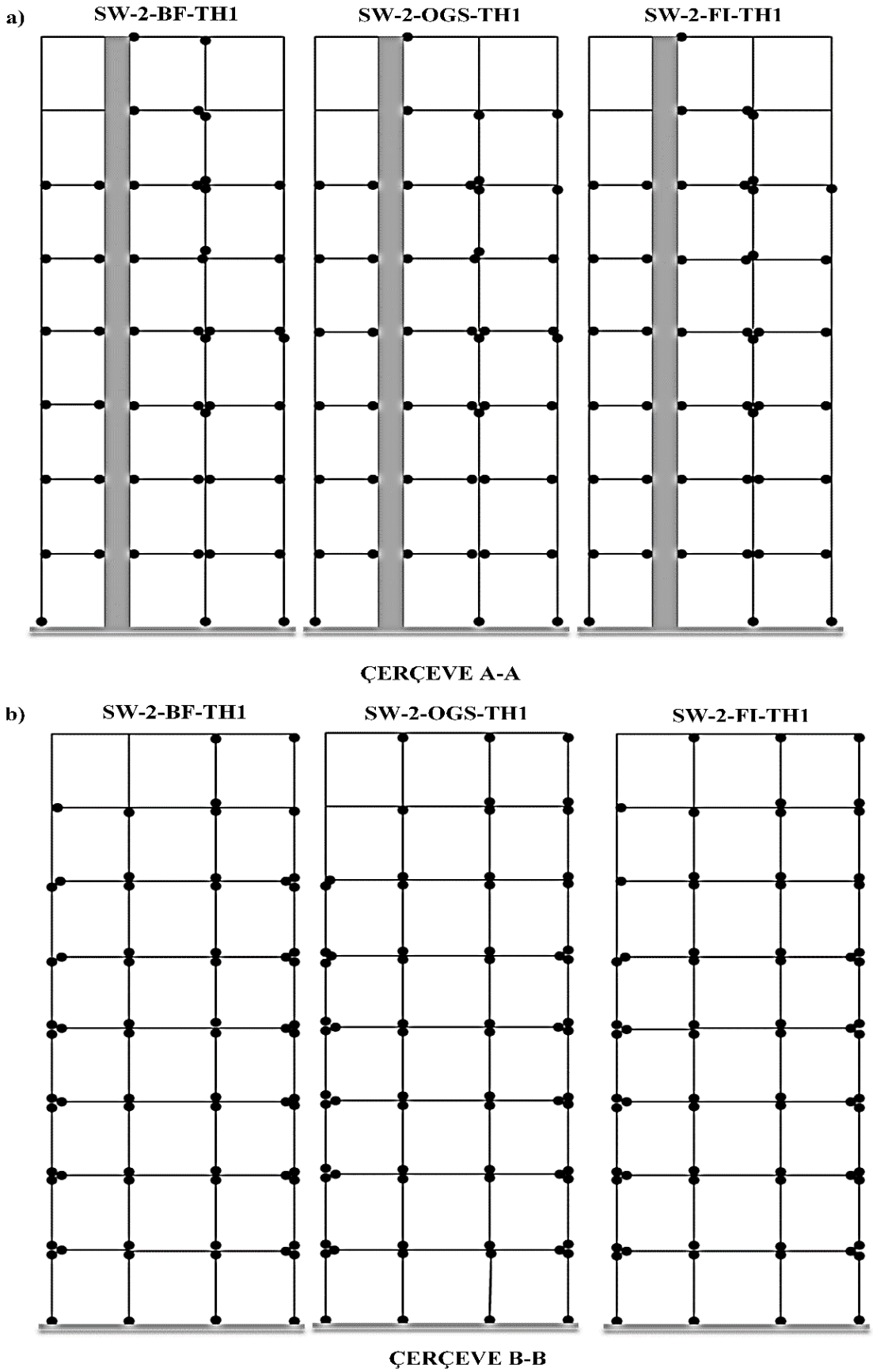
Uçar [30]'da sunulan tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, zemin kat plastik mafsal sayı ve dağılımlarında sadece tek bir deprem ivme kaydı (TH1) için yapılan analiz sonuçlarına göre NSW grubunda BF modele kıyasla OGS ve FI modellerde bir artış olduğu gözlenmiştir. Bu artış Şekil 10a'da gösterilmektedir. Öte yandan NSW grubundaki diğer ve SW-2 ile SW-4 gruplarındaki tüm analizlerde zemin kat plastik mafsal sayı ve dağılımlarında dolgu duvara bağlı bir farklılık ortaya çıkmamıştır. SW-2 ve SW-4 gruplarında bu durum örnek olarak TH1 için Şekil 11 ve 12'de gösterilmektedir. Ayrıca hiçbir modelin analiz sonucunda tüm yapı için göçme mekanizması ortaya çıkartabilecek bir plastik mafsal dağılımı gözlenmemiştir (Şekil 10b, 11b ve 12b'de gösterilen B-B çerçevelerinde böyle bir mekanizma oluşuyor görünmekle birlikte, Şekil 10a, 11a ve 12a'da gösterilen A-A çerçevelerinde bu durum ortaya çıkmamaktadır). Genel olarak iç akslar üzerindeki B-B çerçevelerinde, dış akslarda yer alan A-A çerçevelerine kıyasla çok daha fazla plastik mafsal oluştuğu görülmektedir. Son olarak NSW modellerle karşılaştırıldıklarında SW-2 ve SW-4 gruplarında perde duvar ilavesinin özellikle ilk katlarda plastik mafsal sayılarını bir miktar azalttığı söylenebilir.



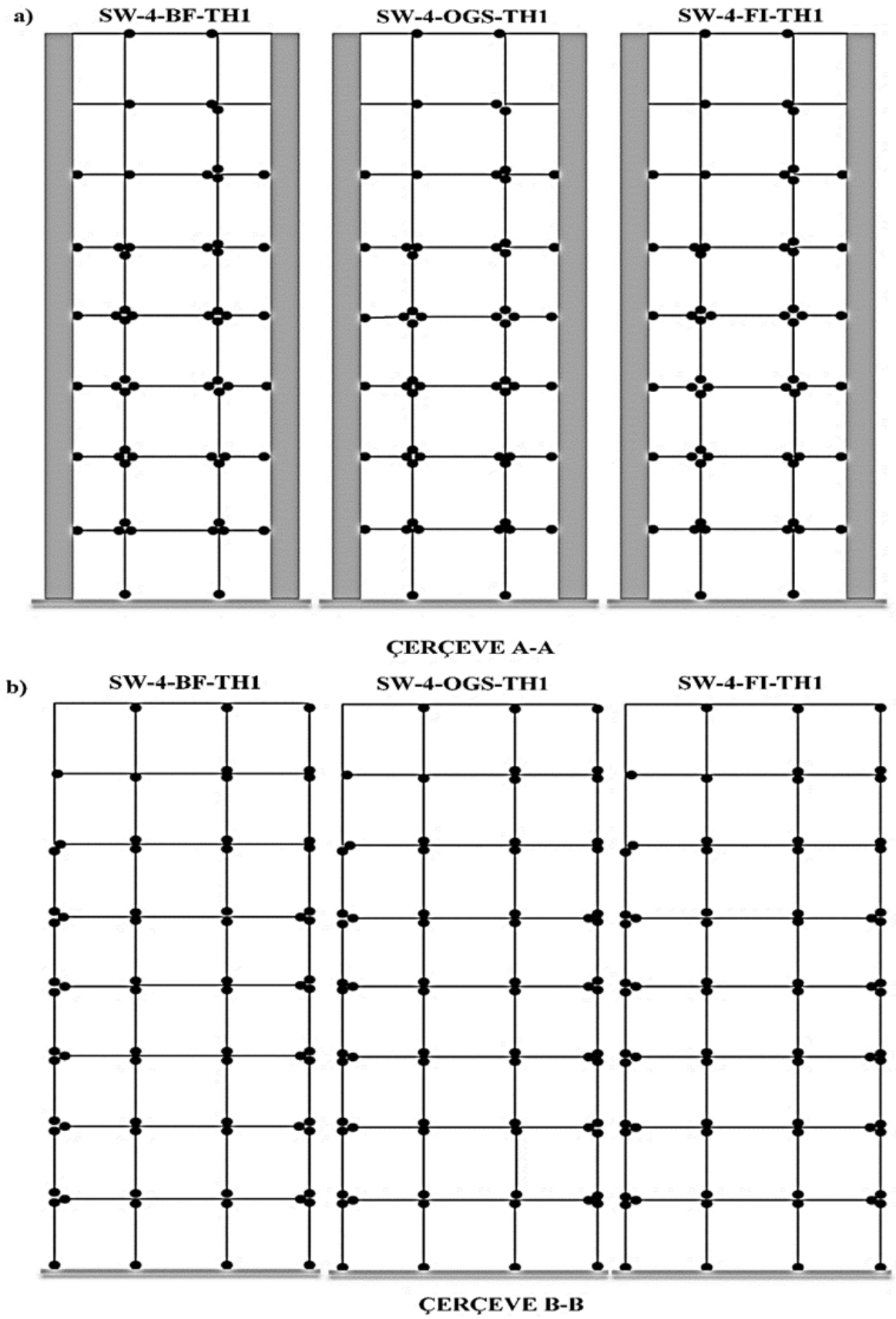
Şekil 5. NSW grubundaki BF modelinin TH1 deprem verisiyle analizi sonucunda C02 kolonunun alt ucunda a. zemin katta ve b. dördüncü katta elde edilen eğilme momenti (kN.m)-dönme (rad.) eğrileri



Şekil 6. (a) A1-A4 ve D1-D4 arasındaki A-A çerçevesi ile (b) B1-B4 ve C1-C4 arasındaki B-B çerçevesine ait NSW grubundaki TH1 deprem ivme kaydına ait plastik mafsal dağılımları



Şekil 7. (a) A1-A4 ve D1-D4 arasındaki A-A çerçevesi ile (b) B1-B4 ve C1-C4 arasındaki B-B çerçevesine ait SW-2 grubundaki TH1 deprem ivme kaydına ait plastik mafsal dağılımları



Şekil 8. (a) A1-A4 ve D1-D4 arasındaki A-A çerçevesi ile (b) B1-B4 ve C1-C4 arasındaki B-B çerçevesine ait SW-4 grubundaki TH1 deprem ivme kaydına ait kolon ve kirişlerin plastik mafsal dağılımları

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, mevcut yönetmeliklere uygun tasarlanmış 8 katlı bir betonarme binada tuğla dolgu duvarın etkisiyle yumuşak kat oluşumu irdelenmiştir. Perde duvarın mevcudiyeti ve miktarına bağlı olarak ve ayrıca dolgu duvar yerleşimine göre 9 farklı model oluşturulmuştur. Bu modellerde yer alan dolgu duvarlar eşdeğer basınç ve kayma çubukları ile temsil edilmişlerdir. Gerçekleştirilen statik itme analizi ve zaman tanım alanında dinamik analiz sonuçlarından elde edilen bilgiler aşağıda sunulmuştur.

- Doğrusal olmayan statik itme analiz sonuçlarına göre NSW, SW-2 ve SW-4 gruplarındaki FI modellerin yanal davranışlarında yönetmeliğe göre sınırlı hasar limit durumu olarak tarif edilebilecek bölgede oluşan bir dayanım kaybı gözlenmiştir. Özellikle ilk katlardaki tuğla dolgu duvarların kapasitelerine ulaşmaları sonucunda ortaya çıktığı değerlendirilen dayanım kaybından sonra FI ve OGS modellere ait kapasite eğrileri hemen hemen aynı ilerlemektedir.
- Nihai yanal yük dayanım değerine erişildiğinde NSW ve SW-2 gruplarında FI ve OGS modeller BF modele özdeş hale gelmiş, SW-4 grubunda ise bu durum daha geç olarak gerçekleşmiştir.
- Zaman tanım alanında dinamik analiz sonuçları irdelendiğinde, sekiz katlı bu bina için en büyük göreli kat öteleme oranlarının modellerin tamamına yakınında zemin katın üzerindeki katlarda ortaya çıktığı görülmektedir. Bu sonucun aksine, bu çalışmadaki binaya çok benzer ancak beş katlı olan bir bina için Akın [18] tarafından elde edilen sonuçlara göre özellikle perde duvarsız modelde zemin kattaki göreli kat ötelemeleri belirgin şekilde daha büyük olmuştur. Beş katlı binada ancak artan perde duvarların ilavesiyle bu belirgin durumun ortadan kalktığı görülmektedir.
- Statik itme analiz sonuçlarına benzer şekilde, NSW, SW-2 ve SW-4 gruplarında OGS ve FI modellerin birçoğunda göreli kat öteleme oranlarının birbirine yakın olduğu ve bu durumun perde duvar ilavesiyle daha belirgin şekilde ortaya çıktığı görülebilir.
- Kolon hasar durumlarına bağlı olarak beton birim kısalma sonuçlarına göre NSW grubunda 7, SW-2 ve SW-4 gruplarında ise 5'er adet deprem ivme kaydında OGS modellerde BF modellere kıyasla zemin kat kolonlarında daha fazla hasar meydana gelmiştir.
- Plastik mafsalların dağılımı incelendiğinde, yönetmeliğe uygun tasarlanmış sekiz katlı bu binada perde duvar içeriğinden bağımsız bir şekilde modellerin hiçbirinde göçmeye sebebiyet verecek bir mekanizma durumu gözlenmemektedir. Öte yandan bekleneceği gibi, perde duvar ilavesiyle SW-2 ve SW-4 gruplarında plastik mafsal sayılarının özellikle ilk katlarda azalma eğiliminde olduğu görülmüştür.

Daha önce ifade edildiği gibi Akın [18] tarafından yapılan ve bu çalışmaya çok benzer ancak beş katlı bir yapıyı ele alan çalışmadaki sonuçlar buradakilerden farklılık göstermektedir. O çalışmada özellikle NSW grubunda zemin katta dolgu duvar bulunmamasına bağlı olarak plastik deformasyonların artışına ve bunun sonucunda göçme mekanizmasının ortaya çıkma olasılığına işaret edilmektedir. Plastik mafsal dağılımlarına bakarak SW-2 grubundaki iki perde duvarın ilavesiyle bu olasılığın bir miktar azaldığı, ancak özellikle SW-4 grubunda dört perde duvarın sağladığı rijitlikle ortadan kalktığı belirtilmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %17

Kaynaklar

[1] E. Akın, Strengthening of brick infilled rc frames with CFRP reinforcement-General principles. Ph.D. Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2011.

[2] M. Dolšek and P. Fajfar, Soft storey effects in uniformly infilled reinforced concrete frames. Journal of Earthquake Engineering, 5, 1-12, 2001. https://doi.org/10.1142/S1363246901000315

[3] U. Ersoy and G. Özcebe, Lessons from recent earthquakes in Turkey and seismic rehabilitation of buildings. ACI Special Publication, 197, 105-126, 2002. https://doi.org/10.14359/11929

[4] G. Özcebe, M. S. Yücemen and V. Aydoğan, Statistical seismic vulnerability assessment of existing reinforced concrete buildings in Turkey on a regional scale. Journal of Earthquake Engineering, 8, 749-773, 2004. https://doi.org/10.1142/S1363246904001705

[5] T. Sevil, M. Baran ve E. Canbay, Tuğla dolgu duvarların b/a çerçeveli yapıların davranışına etkilerinin incelenmesi; deneysel ve kuramsal çalışmalar. International Journal of Engineering Research and Development, 2, 35-42, 2010.

[6] M. Tekin, E. Alsancak ve M. Ay, Betonarme Çerçevelerde Dolgu Duvar Etkisinin İncelenmesi. Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 3, 95 – 104, 2007.

[7] V. Bertero, and S. Brokken, Infills in seismic resistant building. Journal of Structural Engineering, 109, 1337-1361, 1983. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1983)109:6(1337)

[8] R. Zarnic, and M. Tomazevic, An experimentally obtained method for evaluation of the behaviour of masonry infilled r/c frames. 9th World Conference on Earthquake Engineering, pp. 863-870, San Fransico, USA, 1984.

[9] A. B. Mehrabi, P. B. Shing, M. P. Schuller and J. L. Noland, Experimental evaluation of masonry-infilled rc frames. Journal of Structural Engineering, 122, 228-237, 1996. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:3(228)

[10] P. Negro and G. Verzeletti, Effect of infills on the global behaviour of r/c frames: energy considerations from pseudodynamic tests. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 25, 753-773, 1996. https://doi.org/10.1002/(SICI)10969845(199608)25:8%3C753::AID-EQE578%3E3.0.CO;2-Q
[11] F. Marjani, Behavior of brick ınfilled reinforced concrete frames under reversed cyclic loading. Ph.D. Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 1997.
[12] A. Hashemi and K. M. Mosalam, Shake table experiment on one-story rc structure with and without masonry infill. Advances in Earthquake Engineering for Urban Risk Reduction, NATO Science Series, Springer, Dordrecht, pp. 411–426, 2006. https://doi.org/10.1007/1-4020-4571-9_27
[13] L. Cavaleri and F. Di Trapani, Cyclic response of masonry infilled RC frames: experimental results and simplified modeling. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 65, 224-242, 2014. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.06.016.
[14] M. Dolšek and P. Fajfar, The effect of masonry infills on the seismic response of a four storey reinforced concrete frame-a probabilistic assessment. Engineering Structures, 30, 1991-2001, 2008. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.04.031.
[15] Comite Euro-International du Beton (CEB). RC frames under earthquake loading: state of the art report. Thomas Telford, London, 1996.
[16] P. G. Asteris, Lateral stiffness of brick masonry infilled plane frames. Journal of Structural Engineering, 129, 1071–1079, 2003. https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339445(2003)129:8(1071).
[17] A. Korkmaz ve T. Uçar, Yumuşak kat düzensizliğinin betonarme binaların deprem davranışında etkisi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 11, 65-76, 2006. https://doi.org/10.17482/uujfe.30831
[18] E. Akın, Open ground story in properly designed reinforced concrete frame buildings with shear walls. Structures, 20, 822-831, 2019. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.07.003
[19] TBDY-2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD), Ankara, Türkiye, 2018.
[20] J. B. Mander, M. J. N. Priestley and R. Park, Theoretical stress-strain model for confined concrete. Journal of Structural Engineering, ASCE, 114, 1804-1826, 1988. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804)
[21] J. E. Martinez-Rueda and A. S. Elnashai, Confined concrete model under cyclic load. Materials and Structures, 30, 139–147, 1997. https://doi.org/10.1007/BF02486385
[22] SeismoStruct (2022), A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures. https://seismosoft.com/product/seismostruct/ Accessed 10 August 2024.
[23] F. J. Crisafulli, Seismic behaviour of reinforced concrete structures with masonry infills. Ph.D. Thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1997.
[24] American Society of Civil Engineers (ASCE). FEMA 356 prestandart and commentary for the seismic rehabilitation of building. Washington, DC, USA, 2000.
[25] T. Paulay and M. J. N. Priestly, Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings. John Wiley& Sons, New York, 1992. https://doi.org/10.1002/9780470172841
[26] R. H. Atkinson, B. P. Amadei, S. Saeb and S. Sture, Response of masonry bed joints in direct shear. Journal of structural engineering, 115, 2276-2296, 1989. https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339445(1989)115:9(2276)
[27] PEER-NGA-West2, PEER Ground Motion Veritabanı https://ngawest2.berkeley.edu/site Accessed 10 August 2024.
[28] Batı Anadolu Çöküntü Bölgesi'nin Paleosismoloji Projesi. T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara, Türkiye, 2007.
[29] SeismoMatch, A computer program for spectrum matching of earthquake records. https://seismosoft.com/products/seismomatch/ Accessed 10 August 2024.
[30] K. C. Uçar, 8 katlı bir betonarme binada tuğla dolgu duvara bağlı yumuşak kat oluşumu. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2024.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 899-906

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Derin öğrenme için otomatik görüntü veri seti oluşturma düzeneği tasarımı ve ceviz cinslerine uygulanması

Design of an automatic image dataset generator for deep learning and its application to walnut species

Cihat Özil[1,*], Mürsel Önder[2]

[1,2] *Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 60150, Tokat Türkiye*

Öz

Geleneksel ceviz sınıflandırma yöntemleri, uzman bilgisine bağımlılık, zaman alıcı süreçler ve subjektif değerlendirmeler gibi sınırlamalar içermektedir. Bu durum, tarım ve gıda endüstrisinde otomatik ve hassas sınıflandırma sistemlerine duyulan ihtiyacı artırmaktadır. Bu ihtiyacı gidermek amacıyla bu çalışmada, Türkiye'de yaygın olarak yetiştirilen beş farklı ceviz cinsinin (Bilecik, Chandler, Fernette, Yavuz ve Niksar) sınıflandırılması için özgün ve yüksek çözünürlüklü bir görüntü veri seti oluşturulmuştur. Bu amaç doğrultusunda, cevizlerin 360 derece görüntülenmesini sağlayan otomatik bir veri toplama sistemi tasarlanmış ve geliştirilmiştir. ESP32 mikrodenetleyici, step motor ve yüksek çözünürlüklü bir akıllı telefon kamerasının entegrasyonuyla gerçekleştirilmiştir. Her ceviz, yatay ve dikey eksenlerde 5 derecelik adımlarla 144 farklı açıdan görüntülenmiştir. Görüntüler, kontur kırpma ve arka plan temizleme ile ön işleme tabi tutulmuştur. Elde edilen veri seti eğitim, doğrulama ve test kümelerine ayrılarak düzenli şekilde organize edilmiştir. Bu çalışma, ceviz sınıflandırmasına yönelik gelecek araştırmalar için güçlü bir altyapı sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Ceviz sınıflandırması, Ceviz veri seti, Otomatik veri toplama, 360 derece görüntüleme, ESP32 mikrodenetleyici

Abstract

Traditional walnut grading methods have limitations such as dependence on expert knowledge, time-consuming processes and subjective evaluations. This situation increases the need for automatic and precise classification systems in agriculture and food industry. In order to fulfil this need, in this study, a unique and high resolution image dataset was created for the classification of five different walnut varieties (Bilecik, Chandler, Fernette, Yavuz and Niksar) widely grown in Turkey. For this purpose, an automatic data acquisition system that allows 360-degree imaging of walnuts was designed and developed. It was realised with the integration of an ESP32 microcontroller, stepper motor and a high-resolution smartphone camera. Each walnut was imaged from 144 different angles in 5-degree steps on the horizontal and vertical axes. The images were preprocessed with contour cropping and background removal. The resulting dataset was organised into training, validation and test sets. This study provides a strong foundation for future research on walnut classification.

Keywords: Walnut classification, Walnut dataset, Automatic data acquisition, 360 degree imaging, ESP32 microcontroller

1 Giriş

Ceviz, hem ekonomik hem de kültürel açıdan önemli bir tarım ürünüdür. Gıda endüstrisinde, yağ üretiminden tatlılara kadar geniş bir kullanım alanına sahip olan ceviz, aynı zamanda yüksek besin değerleri (protein, lif, antioksidanlar vb.) ile insan sağlığı için faydalı bir gıda olarak kabul edilmektedir [1]. Bunun yanı sıra, ceviz ağacı kerestesi mobilya ve dekorasyon sektöründe tercih edilen değerli bir materyaldir. Kültürel açıdan da ceviz, geleneksel mutfaklardan yöresel el sanatlarına kadar pek çok alanda yer bulmaktadır [2].

Ceviz cinslerinin doğru bir şekilde tanımlanması ve sınıflandırılması, tarım ve ticaret açısından büyük önem taşımaktadır. Çiftçiler için doğru cins belirleme, ürün verimliliğini, kalitesini (boyut, kabuk yapısı, iç doluluk vb.) ve hastalıklara dayanıklılığını artırırken, tüccarlar için ticari değerleme süreçlerini (fiyatlandırma, kalite kontrol vb.) kolaylaştırır. Ayrıca tüketicilerin doğru bilgilendirilmesi, ürün tercihlerini bilinçli bir şekilde yapmalarına olanak tanır [3]. Geleneksel sınıflandırma yöntemleri (örneğin, morfolojik inceleme, uzman tadımı), uzman bilgisi gerektirmesi, subjektif olabilmesi ve zaman alıcı olması gibi nedenlerle sınırlılıklar taşımaktadır. Bu bağlamda, görüntü tabanlı sınıflandırma yöntemleri, hızlı, objektif, tekrarlanabilir ve otomasyona uygun olmaları nedeniyle dikkat çekmektedir [4].

Dijital teknolojilerin tarım sektöründeki uygulamaları, verimliliği arttırmak ve hata oranlarını azaltmak için yaygınlaşmaktadır. Özellikle meyve sınıflandırması gibi belirli tarım ürünlerinde, bu teknolojiler manuel süreçlere kıyasla daha hassas analiz ve hızlı sonuç sunarak büyük bir fark yaratmaktadır [5]. Özellikle meyve sınıflandırması

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: cihatozil@hotmail.com (C. Özil)
Geliş / Received: 26.01.2025 Kabul / Accepted: 24.04.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1627310

alanında yapılan çalışmalar, yapay zekâ ve görüntü işleme teknolojilerinin bir araya getirilmesiyle dikkat çekmektedir. Örneğin, Unay ve Gosselin [6], meyve sınıflandırmasında renk ve doku özelliklerinin kullanımını araştırmış, Taner vd. [7] ise elma sınıflandırması için makine öğrenimi yöntemlerini uygulamıştır. Benzer şekilde, Vo vd. [8], mango sınıflandırmasında görüntü işleme ve destek vektör makinelerini birleştirerek etkili bir çözüm sunmuştur. Bu çalışmada, özellikle renk ve doku özelliklerinin kombinasyonu ile sınıflandırma doğruluğunun artırıldığı görülmüştür. Meyve ve tarım ürünlerinin sınıflandırılması üzerine yapılan çalışmalar, özellikle yapay zekâ destekli sistemlerin kullanımının artmasıyla ivme kazanmıştır. Örneğin, Taner vd. [7], elma sınıflandırmasında makine öğrenimi yöntemlerini kullanmış ve büyük bir başarı elde etmiştir. Benzer şekilde, Kumar vd. [9] nar sınıflandırmasında görüntü işleme tekniklerini başarıyla uygulamıştır. Ancak, ceviz gibi özel tarım ürünleri için veri setlerinin sınırlı olması, bu alandaki çalışmaları zorlaştırmaktadır.

Görüntü tabanlı sınıflandırma, ceviz gibi tarım ürünlerinin belirli görsel özelliklerine (boyut, şekil, renk, doku, kabuk yapısı vb.) dayanarak hızlı ve hassas analizler yapılmasını sağlar. Bu yöntem, insan hatasını en aza indirerek ve işlemleri hızlandırarak tarımsal süreçlerde önemli bir avantaj sunar. Mevcut görüntü tabanlı yöntemlerin çoğu, uzman bilgisine ihtiyaç duymakta ve sınırlı sayıda veri seti ile çalışmaktadır. Bu durum, daha genel, sağlam ve uygulanabilir otomatik sınıflandırma sistemlerinin geliştirilmesini zorlaştırmaktadır [10]. Özellikle derin öğrenme tabanlı yöntemlerin başarısı, büyük ve çeşitli veri setlerinin mevcudiyetine bağlıdır [11].

Çalışmanın amacı, ceviz sınıflandırması için kullanılacak özgün ve zengin bir görüntü veri seti oluşturmaktır. Çalışmanın kapsamı, sadece veri seti oluşturma süreciyle sınırlıdır. Veri toplama, görüntü ön işleme ve veri setinin organizasyonu süreçlerinde kullanılan yöntemler detaylı olarak açıklanmış, oluşturulan veri setinin yapay zeka, makine öğrenmesi ve görüntü işleme gibi alanlarda potansiyel kullanım alanları vurgulanmıştır. Bu veri setinin, ceviz sınıflandırması üzerine yapılacak gelecekteki araştırmalar için önemli bir temel oluşturması ve otomatik sınıflandırma sistemlerinin geliştirilmesine katkıda bulunması beklenmektedir.

Bu çalışmanın literatüre ve tarım sektörüne sağladığı temel katkılar şu şekilde özetlenebilir:

- Özgün Bir Veri Seti: Beş farklı ceviz cinsine ait yüksek çözünürlüklü ve çok açılı görüntülerden oluşan özgün bir veri seti oluşturulmuştur.
- Otomatik Veri Toplama Sistemi: Veri toplama sürecini hızlandıran, tutarlı ve tekrarlanabilir bir otomasyon sistemi geliştirilmiştir.
- Veri Ön İşleme Yöntemleri: Kontur kırpma ve arka plan temizleme gibi veri kalitesini artıran ön işleme yöntemleri uygulanmıştır.
- Genelleştirilebilir Model: Geliştirilen metodoloji, diğer tarım ürünlerinin görüntü tabanlı sınıflandırması için de uygulanabilir bir çerçeve sunmaktadır.

Bu çalışma, ceviz sınıflandırması için görüntü tabanlı bir sistem geliştirme sürecini içermektedir. Öncelikle, farklı ceviz cinslerinin belirlenmesi ve veri toplama sisteminin tasarlanması gerçekleştirilmiştir. Ardından, otomatik görüntü toplama süreci yürütülmüş ve veri seti oluşturulmuştur. Son aşamada ise, elde edilen görüntüler işlenerek sınıflandırmaya uygun hale getirilmiştir. Gelecek çalışmalarda, oluşturulan veri setinin farklı derin öğrenme modelleriyle test edilmesi ve model doğruluğunun artırılması hedeflenmektedir. Ayrıca, sistemin diğer tarım ürünlerine uygulanabilirliğini araştırmak için yeni denemeler yapılacaktır.

2 Materyal ve metot

Bu çalışma, Türkiye'de yaygın olarak yetiştirilen beş farklı ceviz cinsinin otomatik sınıflandırılması için bir görüntü veri seti oluşturma sürecini ve kullanılan yöntemleri detaylandırmaktadır.

2.1 Ceviz cinsleri:

Çalışmada kullanılan beş farklı ceviz cinsi, ticari önemleri, yaygınlıkları ve farklı morfolojik özelliklere sahip olmaları kriterlerine göre seçilmiştir. Numuneler, Tokat ili, Niksar ilçesi, Sorhun köyünden temin edilmiştir. Kullanılan cinsler ve açıklamaları şöyledir:

- 'Bilecik' Cinsi: Türkiye'ye özgü, yerli bir çeşittir. Orta büyüklükte meyvelere, ince kabuklu ve yüksek iç oranına sahiptir. Yağ oranı yüksektir [12].
- 'Chandler' Cinsi: ABD kökenli, ince kabuklu, yüksek verimli ve geç çiçeklenen bir çeşittir. Dünya genelinde en çok yetiştirilen ceviz çeşitlerinden biridir. Yan dallarda meyve verme özelliği yüksektir [13].
- 'Fernette' Cinsi: Fransa kökenli, geç çiçeklenen ve Chandler çeşidini dölleyici olarak kullanılan bir çeşittir. Soğuklara dayanıklıdır [14].
- 'Yavuz' Cinsi: Türkiye'ye özgü, yerli bir çeşittir. Küçük-orta büyüklükte meyvelere ve yüksek iç kalitesine sahiptir. Erken meyve verme özelliği vardır [15].
- 'Niksar' Cinsi: Türkiye'ye özgü ve coğrafi işaret almış bir çeşittir. İri, oval şekilli, dolgun içli ve yüksek yağ oranına sahiptir. Niksar ve çevresinde yetiştirilmektedir [16].

Şekil 1. Veri setinde bulunan 5 farklı ceviz cinsi

2.2 Kullanılan ekipmanlar:

- ESP32 Mikrodenetleyici (ESP32-WROOM-32): Fotoğraf çekim sürecini otomatikleştirmek ve step motoru kontrol etmek için kullanılmıştır. Bu mikrodenetleyici, çift çekirdekli bir işlemciye, 4 MB flaş belleğe ve Wi-Fi/Bluetooth bağlantı özelliklerine sahiptir [17]. Çalışmada Arduino IDE, C++ ve Python programlama dili kullanılmıştır.

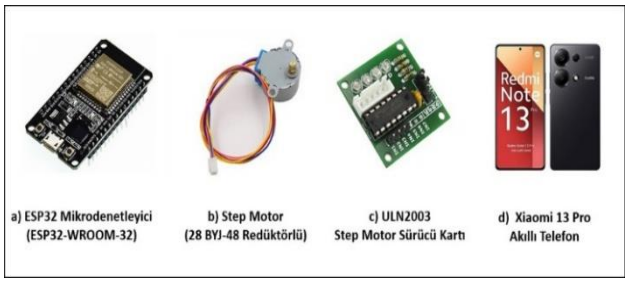
• Step Motor (28 BYJ-48 Redüktörlü): Cevizlerin dikey ve yatay eksenlerde hassas dönüşünü sağlamıştır. Bu motor, düşük hızda yüksek hassasiyetli hareket sağlamaktadır. Bir ULN2003 motor sürücü modülü kullanılarak, hareket kontrolü gerçekleştirilmiştir [18]. Motorun küçük boyutları ve enerji verimliliği, çalışmada tercih edilme nedenleri arasında yer almaktadır.

• Xiaomi 13 Pro Akıllı Telefon: Yüksek çözünürlüklü görüntüler elde etmek için kullanılmıştır. Telefonun ana kamerası, 50 MP çözünürlüğe, 1 inç sensör boyutuna, f/1.9 diyafram açıklığına ve 23 mm odak uzaklığına sahiptir [19]. Çekimler otomatik modda, otomatik odaklama ve otomatik beyaz dengesi ayarlarıyla ve JPEG formatında gerçekleştirilmiştir.

• Aydınlatma: Fotoğraflar, ev ortamında, akşam saatlerinde ve tutarlı bir aydınlatma koşulunda çekilmiştir. Telefon, cevizlere yaklaşık 30 cm uzaklıkta konumlandırılmıştır. Bu düzenleme, gölgeleri en aza indirerek ve eşit bir aydınlatma sağlayarak görüntülerin tutarlılığını sağlamıştır.

• Arka Plan: Düz beyaz bir mat karton zemin kullanılmıştır. Bu, cevizlerin konturlarını net bir şekilde belirlemeye ve arka plan gürültüsünü en aza indirmeye yardımcı olmuştur.

• Diğer Ekipmanlar: Cevizleri sabitlemek için 3D yazıcıda PLA filament kullanılarak özel olarak tasarlanmış bir platform kullanılmıştır. Bu platform, cevizlerin çekimler sırasında aynı pozisyonda kalmasını sağlamıştır. USB kablosu, görüntülerin bilgisayara aktarılması için kullanılmıştır.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan donanımlar.

2.3 Veri toplama prosedürü:

Çalışmada her bir ceviz cinsinden beşer adet numune kullanılmıştır. Bu numune sayısının azlığı, çalışmanın önemli bir sınırlamasıdır ve gelecekteki çalışmalarda daha fazla numune kullanılması gerekmektedir. Numuneler, ortalama boyutlarda, olgun, kabukları hasarsız, çatlak ve gözle görülür kusurları olmayan cevizlerden seçilmiştir. Cevizlerin boyutları cetvel ile ölçülerek ortalama boyutlarda olduklarından emin olunmuştur. Bu, veri setinde boyut çeşitliliğini kontrol altında tutmak ve modelin belirli boyutlara aşırı uyum sağlamasını engellemek için yapılmıştır. Niksar, Bilecik, Chandler, Fernette ve Yavuz cinslerine ait numuneler, 2024 yılı Ekim ayında, ceviz hasat zamanı, Tokat ilinin Niksar ilçesine bağlı Sorhun köyündeki yerel üreticilerden temin edilmiştir.

Her bir ceviz, dikey ve yatay eksende 5 derecelik adımlarla 144 farklı açıdan fotoğraflanmıştır. Bu yöntem, cevizlerin 360 derece tam bir görünümünü elde ederek veri setindeki çeşitliliği artırmayı amaçlamaktadır. 5 derecelik adım seçimi, yeterli detay yakalarken veri setinin boyutunu makul bir seviyede tutmak ve işlem yükünü dengelemek için yapılmıştır. Daha küçük adımlarla (örneğin 2.5 derece) daha fazla görüntü elde edilebilir ancak bu, veri setinin boyutunu ve işlem yükünü önemli ölçüde artıracaktır. 5 derecelik adımlar, cevizlerin morfolojik özelliklerini yeterince yakalamak için uygun bir denge sağlamaktadır.

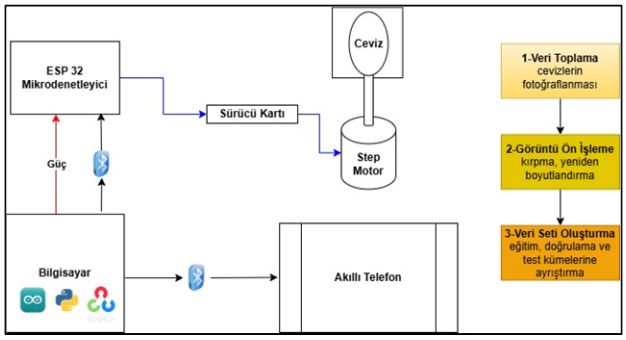
Bu işlem için step motor, ESP32 mikrodenetleyici ve telefonun kamera uygulaması senkronize çalıştırılmıştır. Step motorun kontrolü ve Bluetooth Low Energy (BLE) iletişimi Arduino IDE kullanılarak C++ ile programlanmış ESP32 mikrodenetleyici tarafından sağlanmıştır. Telefonun kamera uygulamasının açılması ve tetiklenmesi ise Python programlama dili ile geliştirilen bir “script” aracılığıyla, BLE üzerinden ESP32 ile iletişim kurularak gerçekleştirilmiştir [20].

Sistem şu şekilde çalışmaktadır: Python “script”i, BLE üzerinden ESP32'ye "start" komutu göndererek motorun dönmesini başlatır. ESP32, motoru her 5 derecede bir döndürür ve her dönüşte Python “script”ine "Capture" mesajı gönderir. Python “script”i bu mesajı aldığında, ADB (Android Debug Bridge) komutlarını kullanarak telefonun kamerasını tetikler ve fotoğraf çeker. Motor tam bir tur (360 derece) döndükten sonra ESP32, Python “script”ine "StopCapture" mesajı göndererek fotoğraf çekme işlemini sonlandırır [21]. Bu senkronizasyonu sağlayan algoritma yapısı şu şekildedir:

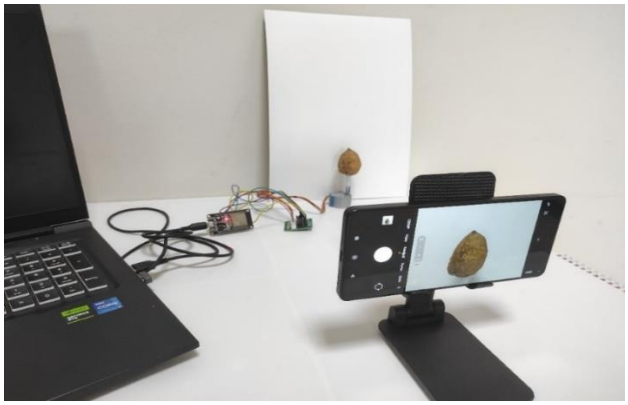
Algoritma:

• Başlangıç (Python):
o BLE üzerinden ESP32 ile bağlantı kurulur.
o ADB ile telefonun kamera uygulaması açılır.
o ESP32'ye "start" komutu gönderilir.
• Döngü (ESP32):
o Motor 5 derece döndürülür.
o Python “script”ine "Capture" mesajı gönderilir.
o Döngü 72 kez tekrarlanır (360 derece tamamlanana kadar).
• Fotoğraf Çekme (Python):
o ESP32'den "Capture" mesajı alındığında, Android Debug Bridge (ADB) üzerinden gönderilen input keyevent 27 komutu kullanılarak telefonun kamera uygulaması tetiklenir ve fotoğraf çekilir. Bu komut, Android cihazlarda kamera uygulamasını açmak ve fotoğraf çekmek için standart bir yöntemdir. Alternatif olarak, input tap x y komutu kullanılabilir. Bu komut, belirli ekran koordinatlarına dokunma simülasyonu yapar. x ve y koordinatları, telefonun ekranındaki kamera tetikleme butonunun bulunduğu noktanın koordinatlarıdır. Bu koordinatlar, telefonun geliştirici seçeneklerinde "Pointer location" özelliği etkinleştirilerek tespit edilebilir [22].
• Bitiş (ESP32):
o Tam tur tamamlandığında Python scriptine "StopCapture" mesajı gönderilir.
• Bitiş (Python):

- ESP32'den "StopCapture" mesajı alındığında fotoğraf çekme işlemi sonlandırılır.



Şekil 3. Veri seti oluşturma sisteminin blok diyagramı



Şekil 4. Veri toplama sisteminin genel görünümü

Görüntüler, telefonun hafızasına kaydedildikten sonra USB kablosu aracılığıyla bilgisayara aktarılmıştır. Aktarım sırasında veri kaybını önlemek için güvenli dosya aktarım protokolleri kullanılmıştır.

Veri toplama sürecinde bazı zorluklarla karşılaşılmıştır:

- Aydınlatma koşullarındaki küçük değişiklikler: Çekimler, ev ortamında akşamları aynı aydınlık koşullarında ve aynı saatlerde gerçekleştirilmiştir. Bu sayede tutarlı bir aydınlatma sağlanmış ve çekim setinden önce beyaz dengesi kontrol edilerek olası farklar en aza indirilmiştir.
- Motorun bazen atlaması: Motor atlamaları tespit edilerek atlayan çekimler tekrarlanmıştır. Ayrıca, motor sürücüsünün akım ayarları kontrol edilerek ve motor bağlantılarının sağlamlığı kontrol edilerek atlama sorunlarının önüne geçilmeye çalışılmıştır. Mikro adım sürücüsünün doğru bir şekilde yapılandırıldığından ve motorun torkunun cevizleri döndürmek için yeterli olduğundan emin olunmuştur.
- Bluetooth bağlantı sorunları: Bazen Bluetooth bağlantısı kesilmiş veya veri iletiminde sorunlar yaşanmıştır. Bu gibi durumlarda, Bluetooth bağlantısı yeniden başlatılmış ve Python scriptinin doğru çalıştığından emin olunmuştur.
- ADB bağlantı sorunları: Bazen ADB bağlantısı kesilmiş veya komutlar doğru şekilde iletilmemiştir. Bu gibi durumlarda USB kablosu kontrol edilmiş, telefonun USB hata ayıklama modu yeniden başlatılmış ve bilgisayardaki ADB sürücülerinin güncel olduğundan emin olunmuştur.

Bu zorluklar ve çözüm yöntemleri kayıt altına alınarak veri toplama sürecinin şeffaflığı ve tekrarlanabilirliği sağlanmıştır.

2.4 Veri ön işleme:

Bu aşamada, veri setindeki görüntülerin derin öğrenme model eğitimine uygun hale getirilmesi için bir dizi ön işleme adımı, Python programlama dili ve OpenCV kütüphanesi kullanılarak uygulanmıştır. Bu adımlar boyutlandırma, kontur kırpma ve veri seti ayrıştırmadır.

2.4.1 Boyutlandırma

Orijinal çözünürlükteki fotoğraflar, OpenCV'nin cv2.resize() fonksiyonu ve bilinear interpolasyon yöntemi kullanılarak 512x512 piksel boyutuna yeniden boyutlandırılmıştır. Bu işlem, modelin giriş katmanına uygun bir boyut sağlamanın yanı sıra, gereksiz işlem yükünü azaltmayı hedeflemektedir. Bilinear interpolasyon, görüntüdeki önemli detayları korurken, daha hızlı bir yeniden boyutlandırma sağlar. Farklı interpolasyon yöntemleri (örneğin bicubic, Lanczos) de denenebilir ve sonuçlar karşılaştırılabilir [23].

2.4.2 Kontur kırpma ve arka plan temizleme

Cevizlerin görüntülerdeki arka plandan ayrılması ve sadece cevizlerin kalması için kontur kırpma yöntemi kullanılmıştır. Bu işlem için OpenCV kütüphanesindeki findContours ve boundingRect fonksiyonları kullanılmıştır [24]. İşlem adımları şöyledir:

1. cv2.cvtColor fonksiyonu ile görüntü gri tonlamaya dönüştürülmüştür.
2. cv2.GaussianBlur fonksiyonu ile görüntüdeki gürültüyü azaltmak için Gaussian bulanıklaştırma uygulanmıştır.
3. cv2.threshold fonksiyonu kullanılarak ikili eşikleme ile cevizler arka plandan ayrılmıştır. Kodda eşik değeri 190 olarak belirlenmiştir. Bu değer, cevizlerin ve arka planın kontrastına göre ayarlanabilir. cv2.THRESH_BINARY_INV parametresi kullanılarak, cevizler beyaz, arka plan siyah olarak işaretlenmiştir.
4. cv2.findContours fonksiyonu ile konturlar bulunmuştur. Bu fonksiyon için RETR_EXTERNAL (sadece dış konturları bulur) ve CHAIN_APPROX_SIMPLE (kontur noktalarını sıkıştırır) parametreleri kullanılmıştır.
5. En büyük kontur (ceviz konturu olduğu varsayılır) seçilmiştir.
6. cv2.boundingRect fonksiyonu ile bu konturu çevreleyen dikdörtgen alan bulunmuştur.
7. Görüntü bu dikdörtgen alana göre kırpılmıştır.
8. Alt Kısım Temizleme: Python kodunda, kırpılan görüntünün alt kısmında kalan beyaz alanları temizlemek için ek bir işlem yapılmıştır. Bu işlemde, kırpılan görüntünün her satırındaki piksel değerlerinin toplamı hesaplanmış ve belirli bir eşik değerinin üzerinde beyazlık içeren satırlar tespit edilerek görüntü bu noktadan kırpılmıştır. Bu, özellikle fotoğraflarda cevizlerin altında kalan tabla veya zemin gibi kısımların temizlenmesini sağlamıştır.

Şekil 5. Orijinal ve veri ön işleme yapılmış görüntü

2.4.3 Veri seti ayrıştırma

Önceden işlenmiş görüntüler, Python'da bulunan train_test_split fonksiyonu kullanılarak %50 eğitim, %25 doğrulama ve %25 test olmak üzere rastgele olarak ayrılmıştır. Bu oranlar, veri setinin sınırlı boyutu göz önünde bulundurularak tercih edilmiştir. Derin öğrenme uygulamalarında yaygın olarak kullanılan %70 eğitim, %15 doğrulama ve %15 test oranlarına kıyasla, bu oranlar daha dengeli bir dağılım sağlamaktadır. Daha büyük veri setlerinde farklı oranlar (örneğin %80 eğitim, %10 doğrulama, %10 test) kullanılabilir. Ayrıştırma işlemi, her bir cinsin veri setinde orantılı olarak temsil edilmesini sağlamak için katmanlı örnekleme (stratified sampling) yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Bu, modelin tüm cinsleri eşit şekilde öğrenmesine yardımcı olur [25]. Python'da sklearn.model_selection modülünden train_test_split fonksiyonu bu işlem için kullanılmıştır ve random_state parametresi ile rastgelelik kontrol altına alınmıştır. Veri setinin ayrıştırılması ve kaydedilmesi için gerekli klasörler Python kodu tarafından otomatik olarak oluşturulmaktadır.

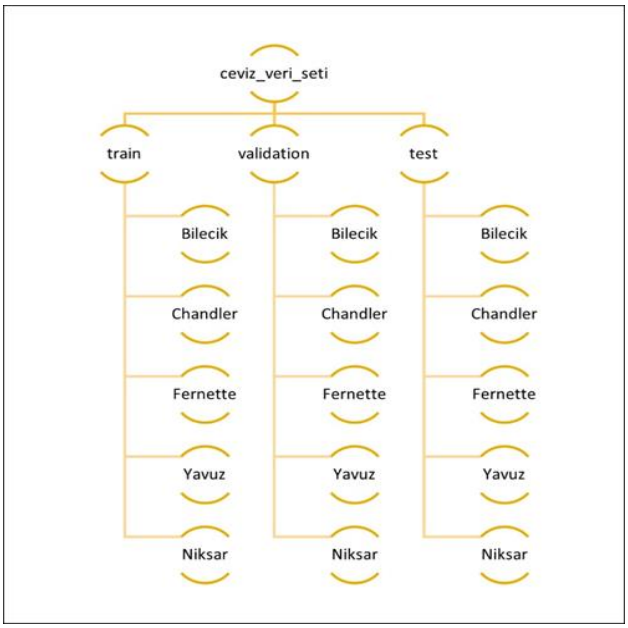
2.5 Klasör organizasyonu:

Veri setinin düzenli ve erişilebilir olması için standart bir klasör yapısı oluşturulmuştur. Bu yapı, veri setinin farklı algoritmalar ve platformlar üzerinde kullanılabilirliğini artırmaktadır. Ana klasör ceviz_veri_seti olarak adlandırılmıştır ve tüm verileri içermektedir. Bu klasörün altında, veri setinin eğitim, doğrulama ve test kümelerine ayrılmış halleri bulunmaktadır.

Veri seti, ön işleme adımları (2.4. Veri Ön İşleme bölümünde açıklanan boyutlandırma ve kontur kırpma işlemleri) uygulandıktan sonra, train, validation ve test adlı klasörlere ayrılmıştır. Her bir klasörün içinde, ceviz cinsleri için alt klasörler bulunur. Her bir ceviz cinsinden 5 adet ceviz bulunmaktadır ve her ceviz için yatay ve dikey eksenlerde 144 farklı açıdan çekilmiş görüntü mevcuttur. Bu, her bir ceviz cinsi için toplamda 5 x 144 = 720 görüntü anlamına gelir. Bu bilgiler ışığında klasör yapısı ve görüntü sayıları dağılımı aşağıdaki gibidir:

Tablo 1. Veri setindeki ceviz cinslerinin görüntü sayıları

Ceviz Cinsi	Eğitim Görüntü Sayısı	Doğrulama Görüntü Sayısı	Test Görüntü Sayısı
Bilecik	360	180	180
Chandler	360	180	180
Fernette	360	180	180
Yavuz	360	180	180
Niksar	360	180	180



Şekil 6. Veri seti klasör yapısı

Bu klasör yapısında:

- ceviz_veri_seti/ ana klasördür ve tüm verileri içerir.
- train/, validation/ ve test/ klasörleri, veri setinin eğitim, doğrulama ve test kümelerine ayrılmış halini içerir. Bu klasörlerin her birinde, ceviz cinsleri için alt klasörler bulunur. Bu sayede, her kümede her cinsin örnekleri bulunur ve modelin farklı kümeler üzerinde performansını değerlendirmek mümkün olur.

Bu yapı, veri setinin yönetimi, eğitimi ve değerlendirilmesi için gerekli olan tüm organizasyonu sağlar. Veri setinin ayrıştırılması sırasında oluşturulan train/, validation/ ve test/ klasörleri, 2.4. Veri Ön İşleme bölümünde bahsedilen %50-%25-%25 oranlarına göre otomatik olarak oluşturulmuştur. Bu işlem sırasında, her bir cinsten rastgele seçilen önceden işlenmiş görüntüler ilgili klasörlere kopyalanmıştır. Katmanlı örnekleme uygulandığı için, her kümede her cinsten orantılı sayıda örnek bulunmaktadır. Örneğin, Bilecik cinsinden toplam 720 önceden işlenmiş görüntü varsa, yaklaşık 360 görüntü train/Bilecik/, 180 görüntü validation/Bilecik/ ve 180 görüntü test/Bilecik/ klasörüne kopyalanmıştır. Bu oranlar, küsuratlı sayılar ortaya çıktığında en yakın tam sayıya yuvarlanmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

Çalışma, ceviz sınıflandırması problemi için özgün ve yüksek kaliteli bir görüntü veri seti sunmaktadır. Veri toplama ve işleme süreçlerinde hem yazılım (ESP32 kontrol yazılımı, ADB komutları, Python görüntü işleme kodları) hem de donanım (ESP32 mikrodenetleyici, step motor, yüksek çözünürlüklü akıllı telefon kamerası) unsurları entegre bir şekilde kullanılmıştır. Bu entegre yaklaşım, model performansının artırılmasını hedeflemiştir.

Han vd. [26], elma sınıflandırması ve Lei vd. [27] nar sınıflandırması çalışmaları, bu çalışmanın yöntemleriyle bazı paralellikler göstermektedir. Özellikle, meyve konturlarının tespiti ve sınıflandırmada kullanılması konusunda benzer yaklaşımlar mevcuttur. Ancak, bu çalışma, cevizlerin üç boyutlu yapısını daha iyi yakalamak için 360 derece görüntüleme tekniğini kullanarak literatürdeki diğer çalışmalardan ayrılmaktadır. Bu otomasyon sistemi, cevizlerin her açısının standart ve tekrarlanabilir bir şekilde görüntülenmesini sağlayarak, veri setindeki varyasyonu ve zenginliği önemli ölçüde artırmıştır. Bu, özellikle kabuk yapısındaki ince farklılıkların tespitinde kritik bir rol oynamıştır. Literatürdeki benzer çalışmalarda genellikle manuel görüntüleme yöntemleri kullanıldığından, bu otomasyon sistemi çalışmaya özgün bir değer katmaktadır. Bu sayede, cevizlerin sadece belirli açılardan değil, tüm yüzey özelliklerinin analiz edilmesi mümkün kılınmıştır. Bu, özellikle farklı ceviz cinslerinin kabuk yapısındaki ve şeklindeki ince farklılıkların ayırt edilmesinde önemli bir avantaj sağlamıştır. Literatürde ceviz sınıflandırması üzerine yapılan çalışmalarda, Akça ve Yılmaz [28] ve Ünver vd. [29] gibi kaynaklarda ceviz çeşitlerinin morfolojik farklılıklarının tespit edilmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmalar, ceviz morfolojisini incelemiş olsalar da, çalışmamızda kullanılan 360 derece görüntüleme tekniği ve otomasyon sistemi gibi yenilikçi yaklaşımları içermemektedir.

3.1 Çalışmanın sınırlamaları

Bu çalışmanın bazı sınırlamaları bulunmaktadır. En önemlisi, veri toplama sürecinin yalnızca beş ceviz cinsi (Bilecik, Chandler, Fernette, Yavuz ve Niksar) ve her cins için başlangıçta yalnızca beş örnek ile sınırlı tutulmasıdır. Bu durum, veri setinin genelleştirilebilirliğini sınırlayabilir ve modelin belirli örneklere aşırı uyum (overfitting) göstermesine neden olabilir. Ayrıca, numune sayısının azlığı, istatistiksel analizlerin gücünü de etkileyebilir. Gelecekteki çalışmalarda, daha fazla ceviz cinsi (Türkiye'de yetiştirilen diğer önemli ceviz çeşitleri eklenebilir) ve her bir cins için çok daha fazla örnek (en az 100-200 örnek önerilir) içeren genişletilmiş ve dengeli bir veri seti oluşturulması önerilmektedir. Bu, modelin farklı ceviz çeşitleri arasındaki varyasyonları daha iyi öğrenmesine ve gerçek dünya koşullarına daha iyi uyum sağlamasına yardımcı olacaktır.

Çevresel faktörlerin (ışık koşulları, arka plan farklılıkları, nem, sıcaklık vb.) veri toplama süreci üzerindeki etkisi detaylı olarak araştırılmamıştır. Farklı ışık koşullarında (doğal ışık, yapay ışık, farklı renk sıcaklıkları), farklı arka planlarda (farklı renkler, dokular) ve farklı çevresel koşullarda (farklı nem ve sıcaklık seviyeleri) veri toplanarak modelin bu faktörlere karşı dayanıklılığı artırılabilir. Bu, modelin gerçek dünya uygulamalarında daha güvenilir ve tutarlı sonuçlar vermesini sağlayacaktır.

Veri seti oluşturma aşamasında karşılaşılan teknik zorluklar (aydınlatma koşullarındaki küçük değişiklikler, motorun bazen atlaması, Bluetooth ve ADB bağlantı sorunları) ve bu sorunlara getirilen çözümler (beyaz dengesi kontrolü, motor sürücüsü ayarlarının kontrolü, bağlantıların yeniden başlatılması vb.) detaylı olarak açıklanmıştır. Bu, çalışmanın tekrarlanabilirliğini artırmaktadır.

4 Sonuçlar

Bu çalışma, Türkiye'de yaygın olarak yetiştirilen beş farklı ceviz cinsinin (Bilecik, Chandler, Fernette, Yavuz ve Niksar) otomatik sınıflandırılması için özgün ve yüksek çözünürlüklü bir görüntü veri seti oluşturulmasını başarıyla gerçekleştirmiştir. Bu veri seti, ceviz sınıflandırması alanında gelecekte yapılacak çalışmalar için önemli bir temel oluşturmaktadır. Geliştirilen otomatik veri toplama sistemi, ESP32 mikrodenetleyici, step motor ve yüksek çözünürlüklü akıllı telefon kamerasının entegrasyonuyla cevizlerin 360 derece görüntülenmesini sağlayarak veri setindeki çeşitliliği önemli ölçüde artırmıştır. Uygulanan kontur kırpma gibi ön işleme adımları, görüntüdeki gereksiz arka plan gürültüsünü azaltarak veri setinin kalitesini artırmıştır.

Bu çalışmanın temel katkıları şunlardır:

- Özgün ve Yüksek Kaliteli Veri Seti: Literatürdeki çalışmalara kıyasla daha kapsamlı görsel bilgi sunan, beş farklı ceviz cinsine ait yüksek çözünürlüklü ve çok açılı görüntülerden oluşan özgün bir veri seti oluşturulmuştur.
- Otomatik Veri Toplama Sistemi: Veri toplama sürecini daha verimli, tutarlı ve tekrarlanabilir hale getiren bir otomasyon sistemi geliştirilmiştir.
- Veri Ön İşleme Yöntemleri: Veri setinin kalitesini artıran kontur kırpma gibi ön işleme yöntemleri uygulanmıştır.

Bu çalışma, ceviz yetiştiriciliği, kalite kontrolü ve otomasyonu gibi alanlarda önemli uygulamalara sahip olabilecek bir veri seti sunmaktadır. Oluşturulan bu veri seti, gelecekteki araştırmacılar tarafından cevizlerin otomatik sınıflandırılması için farklı makine öğrenmesi ve derin öğrenme modellerinin geliştirilmesinde kullanılabilir.

Gelecekteki çalışmalar, veri setinin genişletilmesi, farklı çevresel koşullarda veri toplanması ve farklı görüntüleme tekniklerinin denenmesi gibi konulara odaklanabilir. Bu çalışma, tarım sektöründe otomasyonun önemini ve potansiyelini göstermesi açısından da değerlidir. Özetle, bu çalışma, ceviz sınıflandırması alanında özgün ve yüksek kaliteli bir görüntü veri seti oluşturarak önemli bir katkı sağlamaktadır. Geliştirilen veri toplama yöntemi ve oluşturulan veri seti, gelecekteki araştırmalar için sağlam bir temel oluşturacak ve ceviz yetiştiriciliği ve işleme süreçlerinin iyileştirilmesine katkıda bulunacaktır. Bu veri setinin kamuya açık bir şekilde paylaşılması, alanın ilerlemesine önemli bir ivme kazandıracaktır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %4

Kaynaklar

[1] M. Şimşek ve E. Gülsoy, Ceviz ve içerdiği yağ asitlerinin insan sağlığı açısından önemi üzerine yapılan bazı çalışmalar. Journal of the Institute of Science & Technology/Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 6(4), 2016.

[2] A. Şimşek ve B. Temel, Gastronomi turizmi kapsamında geleneksel ürünlerin incelenmesi: Tarsus Mamülü. Mersin Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 5(2), 6-13, 2022. https://doi.org/10.55044/meusbd.1000865.

[3] M. Kilci, Tokat ili Niksar ilçesi ceviz üretim ve pazarlama yapısı (Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü), 2016.

[4] A. Y. Yiğit ve M. Uysal, Nesne tabanlı sınıflandırma yaklaşımı kullanılarak yolların tespiti. Türkiye Fotogrametri Dergisi, 1(1), 17-24, 2019.

[5] H. Şahin, Dijital tarım, Tarım 4.0, akılı tarım, robotik uygulamalar ve otonom sistemler. Tarım Makinaları Bilimi Dergisi, 18(2), 68-83, 2022.

[6] D. Unay and B. Gosselin, Stem and calyx recognition on 'Jonagold'apples by pattern recognition. Journal of food Engineering, 78(2), 597-605, 2007. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.10.038.

[7] A. Taner, M. T. Mengstu, K. Ç. Selvi, H. Duran, İ. Gür and N. Ungureanu, Apple varieties classification using deep features and machine learning. Agriculture, 14(2), 252, 2024. https://doi.org/10.3390/agriculture14020252.

[8] M. T. Vo, T. D. Nguyen and N. T. Dang, Embedded machine learning for mango classification using image processing and support vector machine. In 2019 6th NAFOSTED Conference on Information and Computer Science (NICS) (ss. 279-284). IEEE, 2019. https://doi.org/10.1109/NICS48868.2019.9023803.

[9] P. S. Kumar, S. Sudha, P. Das, D. Pradeep and K. Vijaipriya, Pomegranate quality analysis and classification using feature extraction and machine learning. In 2022 6th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ss. 862-867). IEEE, 2019. https://doi.org/10.1109/ICECA55336.2022.10009628.

[10] K. Kayaalp ve A. Altınalan, Ceviz sürgün görüntüleri kullanılarak ceviz çeşitlerinin sınıflandırılması. Uluborlu Mesleki Bilimler Dergisi, 6(2), 42-52, 2024.

[11] Ş. E. Eze ve S. K. Berkaya, Görüntü ön işleme teknikleri ve derin öğrenme ile bitki zararlılarının sınıflandırılması. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(2), 455-465, 2024. https://doi.org/10.21923/jesd.1490176.

[12] M. Erkol, E. Altuntaş ve H. Tokbaş, Bilecik ve Yalova-3 ceviz çeşitlerinin bazı fiziksel özelliklerine nem içeriğinin etkisi. Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi, (2), 37-43, 2008.

[13] M. B. Olut, Chandler x Kaplan-86 F1 ceviz populasyonunun meyvelerinde yağ asidi ve tokoferol içeriklerinin karakterizasyonu (Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü), 2018.

[14] F. Şen, S. Bilgin, E. Özeker ve N. A. Bilgin, Bazı ceviz çeşitlerinin Menemen ekolojisinde morfolojik ve pomolojik özelliklerinin belirlenmesi. ÇOMÜ Ziraat Fakültesi Dergisi, 6(1), 31-39, 2018.

[15] S. Bayazıt, O. Calıskan and D. Kılıç, Pomological and chemical properties of some walnut genotypes in central Anatolia. Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University (JAFAG), 36(3), 243-249, 2019. https://doi.org/10.13002/jafag4583.

[16] T. Çukur, N. Kızılaslan, F. Çukur ve H. Kızılaslan, Tüketicilerin coğrafi işaretli ürünler için ödeme istekliliğine etki eden faktörler: Niksar ceviz örneği. Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology, 8(11), 2476-2481, 2020. https://doi.org/10.24925/turjaf.v8i11.2476-2481.3898.

[17] F. Başçiftçi ve K. A. Gündüz, Nesnelerin interneti uyumlu mikrodenetleyiciler üzerine bir araştırma. Selçuk Üniversitesi Sosyal ve Teknik Araştırmalar Dergisi, (18), 66-76, 2019.

[18] E. Güler, Fındık zarı uygunluğunun OpenCV ile belirlenmesi için yazılım ve donanım geliştirilmesi (Doktora tezi, Selçuk Üniversitesi), 2018.

[19] Xiaomi. (n.d.). Xiaomi 13 Pro teknik özellikler. Xiaomi Türkiye. https://www.mi.com/tr/product/xiaomi-13-pro/specs/

[20] F. J. Dian, A. Yousefi, and S. Lim. A practical study on Bluetooth Low Energy (BLE) throughput. In 2018 IEEE 9th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON) (ss. 768-771). IEEE, 2018. https://doi.org/10.1109/IEMCON.2018.8614763.

[21] EazSoftware, A comprehensive guide to ADB (Android Debug Bridge): The unsung hero for Android developers. Medium, 2024. https://medium.com/@EazSoftware/a-comprehensive-guide-to-adb-android-debug-bridge-the-unsung-hero-for-android-developers-28b349037436

[22] Android Developers. (t.y.). Android Debug Bridge (adb). https://developer.android.com/tools/adb?hl=tr

[23] S. Balovsyak ve Y. Hnatiuk, Analysis of results of scaling digital images by interpolation algorithms. Security of Infocommunication Systems and Internet of Things, 2(1), 01007-01007, 2024. https://doi.org/10.31861/sisiot2024.1.01007.

[24] Q. Wang, Y. Bi, B. Xue, and M. Zhang, Genetic programming with flexible region detection for fine-grained image classification. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2024. https://doi.org/10.1109/TEVC.2024.3379257.

[25] J. Sadaiyandi, P. Arumugam, A. K. Sangaiah and C. Zhang, Stratified sampling-based deep learning approach to increase prediction accuracy of unbalanced dataset. Electronics, 12(21), 4423, 2023. https://doi.org/10.3390/electronics12214423.

[26] B. Han, J. Zhang, R. Almodfer, Y. Wang, W. Sun, T. Bai and W. Hou, Research on innovative apple grading technology driven by intelligent vision and machine

learning. Foods, 14(2), 258, 2025. https://doi.org/10.3390/foods14020258.

[27] X. Lei, H. Ouyang and L. Xu, Mature pomegranate recognition methods in natural environments using machine vision. Ciencia Rural, 49, e20190298, 2019. https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190298.

[28] Y. Akça ve S. Yılmaz, Tüplerde yetiştirilen farklı ceviz (Juglans regia) çeşitlerine ait çöğürlerin bazı morfolojik özelliklerinin ve kalitelerinin belirlenmesi. Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University (JAFAG), 33(3), 157-166, 2016. https://doi.org/10.13002/jafag950.

[29] H. Ünver, E. Sakar ve M. Sülüşoğlu Durul, Düzce ilinde doğal olarak bulunan ceviz genotipleri arasındaki morfolojik farklılıkların değerlendirilmesi. Turkish Journal of Agricultural and Natural Science, 10(4), 2023. http://doi.org/10.30910/turkjans.1307868.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 907-931

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Büyük ölçekli konveks ve konveks olmayan ekonomik güç dağıtım problemleri için artırımlı sosyal öğrenme tabanlı diferansiyel gelişim algoritmaları

Incremental social learning-based differential evolution algorithms for large-scale convex and nonconvex economic power dispatch problems

Serdar Özyön[1,*]

[1] *Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 43100, Kütahya Türkiye*

Öz

Güç sistemleri mühendisliğinin önemli problemlerinden biri olan, ekonomik güç dağıtımı problemi, mevcut sistemin optimum işletimi için hızlı bir şekilde çözülmesi gereken bir problemdir. Bu problem literatürde, sistemdeki yüklerin farklı kısıtlar altında bütün güç üretim birimleri tarafından en az maliyetle karşılanması şeklinde tanımlanır. Farklı birçok çalışmada, farklı birçok güç sistemi için probleme çözüm aranmıştır. Güç sistemleri yapı ve kısıtlar bakımından birbirlerinden farklı olduklarından problem güncelliğini korumaktadır. Bu çalışmada, modifiye edilmiş IEEE 118 bara 54 generatörlü büyük ölçekli bir güç sistemi için hem konveks yakıt maliyeti fonksiyonları için hem de konveks olmayan yakıt maliyeti fonksiyonları için probleminin çözümü yapılmıştır. Örnek güç sisteminde iletim hattı kayıpları dikkate alınmış ve bu kayıpların hesaplanabilmesi için Newton-Raphson metodu kullanılarak AC yük akışı analizi yapılmıştır. Farklı yapıdaki her iki probleminde, minimum yakıt maliyeti değerlerinin hesaplanabilmesi için diferansiyel gelişim algoritmasına artırımlı sosyal öğrenme yapısı beş farklı şekilde entegre edilerek yeni artırımlı sosyal öğrenme tabanlı diferansiyel gelişim algoritmaları geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Altı farklı algoritma ile yapılan çözümlerde elde edilen sayısal değerler karşılaştırılarak, problemlere özgü en uygun metot belirlenmeye çalışılmıştır. Bütün sonuçlar farklı tablo, grafik ve şekillerle verilmiş ve değerlendirilmiştir. Çalışmada iletim hattı kayıpları Newton-Raphson temelli AC yük akışı ile gerçekçi şekilde hesaba katılmış, ayrıca klasik diferansiyel gelişim algoritmasına artımlı sosyal öğrenme yapıları entegre edilerek çözüm kalitesi ve algoritma kararlılığı artırılarak literatüre katkı sağlanmıştır.

Anahtar kelimeler: AC yük akış analizi, Konveks ve konveks olmayan ekonomik güç dağıtımı, Büyük ölçekli güç sistemleri, Artırımlı sosyal öğrenme, Diferansiyel gelişim algoritması.

Abstract

The economic power dispatch problem, which is one of the important problems of power systems engineering, is a problem that must be solved quickly for the optimum operation of the existing system. This problem is defined in the literature as the ability to meet the loads in the system at the least cost by all power generation units under different constraints. In many different studies, solutions to the problem have been sought for many different power systems. Since power systems differ from each other in terms of structure and constraints, the problem remains current. This study solves the economic power dispatch problem for both convex and non-convex fuel cost functions for a large-scale power system with modified IEEE 118 bus 54 generators. Transmission line losses were considered in the sample power system, and AC load flow analysis was performed using the Newton-Raphson method to calculate these losses. In both problems with different structures, the incremental social learning structure was integrated into the differential evolution algorithm in five different ways to calculate the minimum fuel cost values, and new incremental social learning-based differential evolution algorithms were developed and applied. By comparing the numerical values obtained in solutions made with six different algorithms, the most appropriate method specific to the problems was determined. All results are evaluated using tables, graphs, and figures. In this study, transmission line losses are realistically taken into account with Newton-Raphson based AC load flow and incremental social learning structures are integrated into the classical differential evolution algorithm to improve solution quality and algorithm stability.

Keywords: AC load flow analysis, Convex and non-convex economic power dispatch, Large-scale power systems, Incremental social learning, Differential evolution algorithm.

1 Giriş

Elektrik enerjisi üretimi ve dağıtımı, modern güç sistemlerinde hem ekonomik hem de teknik açıdan optimize edilmesi gereken karmaşık bir süreçtir. Bu sürecin en kritik adımlarından biri, mevcut üretim kaynaklarının sistem kısıtları altında en düşük maliyetle işletilmesini sağlayan ekonomik güç dağıtımı (Economic Power Dispatch - EPD) problemidir. Özellikle büyük ölçekli güç sistemlerinde, üretim birimlerinin sayısının ve iletim hattı karmaşıklığının artması, EPD probleminin çözümünü daha da zorlaştırmakta

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: serdar.ozyon@dpu.edu.tr (S. Özyön)
Geliş / Received: 03.01.2025 Kabul / Accepted: 27.04.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1612958

ve geleneksel yöntemlerin yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Ayrıca, konveks olmayan yakıt maliyeti fonksiyonları ve iletim hattı kayıplarının gerçekçi şekilde modellenmesi, problemin çözümünü daha karmaşık hale getirmektedir [1].

Literatürde elektrik enerjisi üretiminin daha verimli yapılabilmesi konusunda farklı birçok yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan biri de EPD yöntemidir. EPD, sistem tarafından talep edilen güç miktarının, sistem kısıtlarına uyarak, farklı üretim maliyeti değerlerine sahip birimler tarafından en az yakıt maliyetiyle üretilmesi şeklinde tanımlanabilir. EPD, güç sistemlerinde önemli bir problemdir. Probleme, literatürde farklı kısıtlar tanımlanarak ve farklı güç sistemlerine uygulanarak birçok çözüm aranmıştır. Problemde fosil yakıt maliyetinin en aza indirilmesi amaçlandığı için problem en temel optimizasyon problemlerinden biri olarak kabul edilir. EPD problemi konveks ve konveks olmayan yapılarda birçok şekilde tasarlanabilmektedir. Büyük ölçekli güç sistemlerinde EPD probleminin çözümü matematiksel metotlarla oldukça zor ve uzun süreler almaktadır. Bu nedenle problemin çözümünde optimizasyon algoritmaları yaygın olarak kullanılmaktadır [2].

Optimizasyon, çözümü makul sürelerde zor ya da imkânsız olan problemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılan, sonucunda kabul edilebilir bir çözüm seti öneren bir metottur. Eşitlikleri, eşitsizlikleri ve amaç fonksiyonu matematiksel olarak belirlenen problemler için optimizasyon algoritmaları ile makul sürelerde kabul edilebilir çözümler alınabilir. Optimizasyon çalışmaları için çeşitli fiziksel ve biyolojik olaylardan esinlenilerek birçok algoritma geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam etmektedir. Bunlardan en temel olanları genetik algoritma, diferansiyel gelişim algoritması (Differential Evolution - DE) ve parçacık sürü optimizasyonu olarak belirtilebilir. Ortaya atılan bu algoritmalar ilerleyen zamanlarda ortaya atılan birçok metotla da iyileştirilmeye çalışılmışlardır [1]. Algoritma iyileştirme metotlarından biri de artırımlı sosyal öğrenme (Incremental Social Learning-ISL) kavramıdır. ISL temel olarak popülasyon tabanlı meta-sezgisel algoritmalar için önerilmiş ve popülasyonda artırım yapılacak adıma kadar kazanılan öğrenmenin (toplumsal hafıza) kaybedilmemesine yönelik bir metottur.

Literatürde birçok sezgisel ve meta-sezgisel optimizasyon yöntemi EPD probleminin çözümünde uygulanmıştır. Ancak literatürde yer alan bu çalışmaların büyük bir kısmı, iletim hattı kayıplarını ya ihmal etmiş ya da yaklaşık yöntemlerle ele almıştır. Bu da gerçek sistem davranışının yeterince temsil edilmesini engellemiştir. Ayrıca çoğu çalışmada sabit boyutlu popülasyonlar ile işlem yapılmış ve bu durum çözüm uzayının etkin taranmasını sınırlamıştır. Önerilen çalışmada bu eksikliklerin giderilmesi amaçlanmıştır. İletim hattı kayıpları Newton-Raphson temelli AC yük akışı ile gerçekçi şekilde hesaba katılmış, ayrıca klasik DE algoritmasına ISL yapıları entegre edilerek çözüm kalitesinin ve algoritma kararlılığının artırılması hedeflenmiştir. Çalışma için iki farklı literatür taraması yapılmıştır. Bunlardan ilki son dönemde EPD probleminin çözümü için uygulanan sezgisel algoritmalarla alakalı diğeri ise ISL metodunun uygulamasının yapıldığı çalışmalar özetlenmiştir. Literatürde EPD probleminin çözümü için adaptif hibrit geri izlemeli arama algoritması [3], hibrit biyocoğrafya ve diferansiyel gelişim tabanlı optimizasyon metodu [4], hibrit mutasyon stratejili karşıt-mutual öğrenme tabanlı diferansiyel gelişim algoritması [5], hibrit haris şahini optimizasyonu [6], geliştirilmiş sosyal ağ arama algoritması [7], geliştirilmiş kartal-stratejisi arz-talep optimizasyonu [8], ikili öğrenme stratejisine sahip uyarlanabilir geri izleme arama optimizasyon algoritması [9], hibrit çekirge optimizasyon algoritması ile borsa algoritması [10], hibrit çok evrenli optimizasyon metodu [11], ikili zig-zag ve genel tamsayı zig-zag metodlarıyla [12], takviyeli öğrenme tabanlı modifiye guguk kuşu arama algoritması [13], geliştirilmiş iki manta vatozu arama optimizasyonu algoritması [14,15], geliştirilmiş beluga balinası optimizasyonu [16], kısıtlı işbirlikçi uyarlanabilir çok popülasyonlu diferansiyel gelişim algoritması [17], yerçekimi karşıtı tabanlı bulanık yerçekimsel arama algoritması [18], hibrit mutasyon stratejili diferansiyel gelişim algoritması [19], çok gruplu bir deniz avcısı algoritması [20], yenilikçi bir hibrit algoritması [21], karşıt güvercin optimizasyonu algoritması [22], hibrit bilgi edinme-paylaşma diferansiyel gelişim algoritması [23], gradyan arama algoritması ile hibrit bir kapuçin arama algoritması [24], kaotik balçık kalıbı algoritması [25], rulet tekerleği ve Levy uçuş yöntemleri ile bukalemun sürüsü algoritması [26] ve kısıtlı Laplacian biyocoğrafya tabanlı optimizasyon algoritması [27] kullanılmıştır. EPD probleminin çözümü için verilen çalışmalar ayrıntılı olarak incelendiğinde iki farklı durum göze çarpmaktadır. Birincisi çalışmaların birçoğu ya klasik algoritmaların geliştirilmesi üzerine ya da farklı algoritmaların birlikte kullanımlarına yönelik çalışmalardır. İkinci husus ise çalışmalarda ele alınan EPD problemlerinde ya iletim hattı kayıpları ihmal edilmiş ya da bu kayıpların hesaplanmasında yaklaşık değerler veren B kayıp matrisleri kullanılmıştır. Bu durum problemin gerçek Dünya mühendislik problemlerine yakınsamasını engellenmektedir. Bu çalışmada ise iletim hattı kayıpları için AC yük akışı metodu kullanılmış ve iletim hattı kayıpları gerçek değerlerine yakın olarak ele alınmıştır.

Yapılan ikinci literatür taraması ise çalışmada DE algoritması ile birlikte kullanılan ISL metodunun, daha önce hangi algoritmalarla birlikte kullanıldığı ve hangi problem yapılarına uygulandığı üzerinedir. Literatürde ISL metodu, test fonksiyonları için parçacık sürü optimizasyonu algoritmasına [28], yine test fonksiyonları için karınca kolonisi algoritmasına [29], farklı EPD problemleri için yapay arı kolonisi algoritmasına [30-32], test fonksiyonları ve hidrotermal koordinasyon problemi için yerçekimsel arama algoritmasına [33,34] ve test fonksiyonları için diferansiyel gelişim algoritmasına [35] başarıyla uygulanmış ve algoritma performanslarını geliştirmiştir. Bu çalışmada diğer uygulamalardan farklı olarak ISL metodu algoritmaya beş farklı şekilde uygulanmış ve büyük ölçekli EPD problemleri için en uygun artırım metodunun da belirlenmesi amaçlanmıştır.

Çalışmada DE algoritması ISL metodu ile birlikte kullanılarak geliştirilmiştir. ISL tabanlı önerilen bu

algoritma yapılarına (Incremental Social Learning-based Differential Evolution - ISLDE) adı verilmiştir. ISL yapıları beş farklı yaklaşımla algoritmaya uygulanmıştır. DE ve ISLDE algoritmaları ile EPD probleminin çözümü konveks ve konveks olmayan yakıt maliyet fonksiyonları için ilk kez bu çalışmada yapılmıştır. Örnek sistem olarak modifiye edilmiş IEEE 118 baralı 54 generatörlü güç sistemi seçilmiştir. Sistemdeki iletim hattı kayıpları AC yük akışı analizi metoduyla hesaplanmıştır. Yapılan çalışmanın öne çıkan özellikleri ve özgün değeri özetlenecek olursa; çalışmada büyük ölçekli EPD probleminin çözümü AC yük akışı metoduyla birlikte hem konveks hem de konveks olmayan yakıt maliyet fonksiyonları için yapılmış, DE algoritması ISL metoduyla beş farklı yaklaşım kullanılarak geliştirilmiştir. Her bir yaklaşım için problem 30'ar kez çözülmüş ve elde edilen sonuçlar klasik DE algoritması ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak, ISL yapılarının algoritma üzerindeki avantaj ve dezavantajları yorumlanmıştır.

2 Artırımlı sosyal öğrenme tabanlı diferansiyel gelişim algoritması (ISLDE)

2.1 Diferansiyel gelişim algoritması

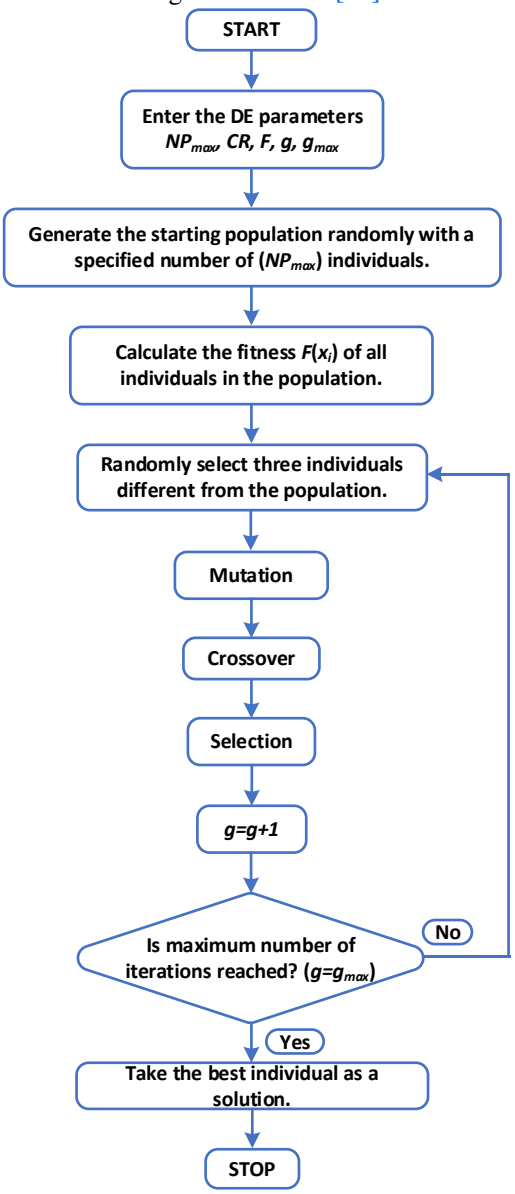
Literatürde popülasyon temelli bir optimizasyon tekniği olarak bilinen DE algoritması, Price ve Storn tarafından 1995 yılında tasarlanmıştır. DE'de probleme ait uygun bir çözümü içinde barındıran değişkenler kümesine kromozom adı verilir. Algoritmanın çalışma mantığı, her biri içinde bir çözüm barındıran, kromozom olarak adlandırılan vektörlerin, çeşitli operatörlere tabi tutularak yeni bir çözüm vektörü oluşturmalarıdır. Bu operatörler sırasıyla seçim, mutasyon ve çaprazlama operatörleridir. Oluşturulan yeni bireyin çözüme yakınlığı (uygunluğu) eskisinden daha iyi ise yeni birey, değilse eski birey bir sonraki popülasyona aktarılır, bu işlemler belirlenen adım sayısı tamamlanıncaya kadar tekrar ettirilir [4, 35, 36].

DE'de optimizasyon işlemi başlamadan belirlenmesi gereken algoritma parametreleri, popülasyonun sayısı (*NP*), değişken (bilinmeyen) sayısı (*D*), maksimum iterasyon sayısı (g_{max}), çaprazlama oranı *(CR)* ve ölçekleme faktörü (*F*)'dir. Algoritmanın işlem basamakları değişkenlerin atanması ve başlangıç popülasyonunun oluşturulması, rastgele oluşturulan bireylerin uygunluklarının hesaplanması, seçim, mutasyon, çaprazlama ve algoritmanın durdurulması şeklindedir. Algoritmaya ait akış şeması Şekil 1'de verilmiştir [35].

Her adımda yeni bir kromozom oluşturmak için popülasyondan üç adet kromozom seçilmesi gerekir. Bu nedenle uygun aramalar yapabilmek için popülasyon büyüklüğünün mutlaka üçten büyük olması gerekir (*NP*>3). *NP* adet *D* boyutlu kromozomdan (birey) meydana gelen başlangıç popülasyonunun üretimi aşağıdaki denklemden yapılır [36].

$$x_{j,i,g=0} = x_j^{(l)} + rand_j[0,1].(x_j^{(u)} - x_j^{(l)}) \quad (1)$$

Denklemde yer alan $x_{j,i,g}$, g popülasyonundaki, i kromozomunun j parametresini, $(x_j^{(l)}, x_j^{(u)})$ ise değişkenlere ait alt ve üst sınırları göstermektedir [35].



Şekil 1. DE'nin akış diyagramı

Popülasyon oluşturulduktan sonra mutasyon işlemine geçilir. Mutasyon, kromozomların belirli adımlarda birbirlerini tekrar etmemesi için seçilen herhangi bir kromozomun genleri üzerinde rastgele değişiklik yapma işlemidir. DE'nin temel yapısında mutasyon işlemi için mevcut kromozom dışında ve birbirlerinden farklı üç ana kromozom seçilir (r_1, r_2, r_3). Seçilen kromozomlardan ilk ikisinin farkı alınarak ölçekleme faktörü (*F*) ile çarpılıp ağırlıklandırılmış fark kromozomu oluşturulur. *F*, [*0-2*] arasında değişen bir değerdir. Daha sonra ağırlıklandırılmış fark kromozomu ile üçüncü kromozom toplanarak ara kromozom oluşturulur. Literatürde birçok çalışmada farklı şekillerde mutasyon operatörü uygulamaları da bulunmaktadır. Bu çalışmada klasik DE için uygulanan

mutasyon işleminin matematiksel ifadesi Denklem (2)'de gösterilmiştir.

$$n_{j,i,g+1} = x_{j,r_3,g} + F.(x_{j,r_1,g} - x_{j,r_2,g}) \quad (2)$$

Denklemde $n_{j,i,g+1}$, mutasyon ve çaprazlaştırmaya tabi tutulmuş ara kromozomu, $F.(x_{j,r1,g}\text{-}x_{j,r2,g})$ ağırlıklandırılmış fark kromozomunu ve $x_{j,r1,g}$, $x_{j,r2,g}$, $x_{j,r3,g}$ birbirinden farklı yeni kromozom üretilmesinde kullanılacak rastgele seçilmiş kromozomları göstermektedir.

Mutasyon sonucunda elde edilen fark kromozomu ve $x_{i,g}$ kromozomu kullanılarak yeni kromozom ($u_{i,g+1}$) üretilir. Deneme kromozomu için genler *CR* olasılıkla fark kromozomundan, (*1-CR*) olasılıkla mevcut kromozomdan seçilir. $j=j_{rand}$ koşulu, en az bir tane genin üretilen yeni kromozomdan alınmasını garanti etmek için kullanılmaktadır. Rastgele seçilen $j=j_{rand}$ noktasındaki bir gen, *CR* değerine bakılmaksızın $n_{j,i,g+1}$'den seçilir [35, 36].

$$x_{j,u,g+1} = \begin{cases} x_{j,n,g+1} & if \quad rand[0,1] \le CR \text{ or } j = j_{rand} \\ x_{j,i,g} & otherwise \end{cases} \quad (3)$$

Mutasyon ve çaprazlama operatörleri kullanılarak hedef kromozomla birlikte üç farklı kromozom kullanılarak yeni bir kromozom (deneme kromozomu) elde edilmiştir. Yeni popülasyona ($g=g+1$) aktarılacak olan kromozom uygunluk değerine bakılarak belirlenir. Hedef kromozomun uygunluk değeri zaten bilinmektedir. Problemin amaç fonksiyonu değeri uygunluk fonksiyonu olarak hesaplanır. Kromozomlardan uygunluğu yüksek olan (çözüm değerine daha yakın olan) kromozom yeni popülasyona aktarılır. Döngü iterasyon sayısı belirlenen maksimum değerine ulaşıncaya ($g=g_{max}$) kadar devam eder, g_{max} olduğunda mevcut popülasyondaki en iyi birey çözüm olarak yazdırılır ve arama sonlandırılır [35].

$$x_{i,g+1} = \begin{cases} x_{u,g+1} & if \quad f(x_{u,g+1}) \le f(x_{i,g+1}) \\ x_{i,g} & otherwise \end{cases} \quad (4)$$

Algoritmadaki amaç her adımda daha iyi uygunluk değerine sahip kromozomlar (çözümler) elde ederek optimum değeri yakalamak ya da bu değere yaklaşmaktır. Bu döngü $g=g_{max}$ olana kadar devam ettirilmektedir. Bu çalışmada algoritmanın durdurma kriteri olarak maksimum iterasyon sayısı seçilmiştir.

2.2 Artırımlı sosyal öğrenme

Sosyal öğrenme (Social Learning-SL) kavramı, toplumu oluşturan bireyler arasındaki bilgi aktarımının genetik özelliklerden bağımsız olarak yapılabilmesi olarak tanımlanmaktadır. Bu kavramın kullanımı çok bireyli sistemlerin yeniden tasarlanması ve hızlandırılması için oldukça uygundur. Bunun nedeni SL yapısının, popülasyona yeni giren bireylerin, popülasyonla ilgili bilgi edinmeleri için zaman harcamadan, daha önce oluşturulmuş diğer deneyimli bireylerden yararlanılmasına olanak tanımasıdır. Fakat yapı üzerinde yapılan teorik modeller ve çalışmalar yalnızca sosyal olarak edinilen bilgiye dayanmanın her zaman avantajlı olmadığı sonucunu göstermişlerdir. Bireylerin toplumsal öğrenmeyle birlikte yenilik yapmak için ilave zamana gerek duydukları belirlenmiştir. ISL olarak adlandırılan bu yeni yaklaşım da, oluşturulan birey hem yenilikçi hem de bireysel olarak öğrenen artan bir popülasyonu oluşturur. ISL yapısı çoklu olarak öğrenen birey sistemlerinde, sisteme belirli aralıklarla yeni bireylerin eklenmesi temeline dayanmaktadır. Bu yapının eklendiği algoritmalar, çözüm uzayında az sayıda bireyle arama yapmaya başlarlar ve hızlı bir öğrenme süreci gerçekleştirirler. Sonraki adımlarda popülasyona mevcut bireylerle çeşitli şekillerde iletişime geçirilen (sosyal öğrenme gerçekleştiren) yeni bireyler eklenerek aramaya devam edilir. Artan nüfus stratejisi, doğada yeni doğan bireylerin, onları çevreleyen yetişkin bireylerden çok fazla beceri öğrenmeleri gözlemine dayanmaktadır. ISL yaklaşımının sözde kodu Şekil 2'de verilmiştir [28-35].

```
Incremental Social Learning (ISL) Algorithm
% Initilization
t=0;
%İnitialize environment E^t
%İnitialize primogenial population of agents X^t
% Main loop
while Stopping criteria not met do
        if Agent addition Schedule or criterion is not met then
                X^(t+1)←ilearn (X^t, E^t) %Individual learning
        else
        Create new agent anew
        slearn (a_new, X^t) %Social learning
        X^(t+1)←X^t U {a_new}
        end if
        E^(t+1)←update (E^t) %Update environment
        t←t+1
        end while
```

Şekil 2. Artırımlı sosyal öğrenme yapısının sözde kodu

2.3 Artırımlı sosyal öğrenme tabanlı diferansiyel gelişim algoritma yapıları

Literatürde verilen popülasyon tabanlı meta sezgisel algoritmaların birçoğu, ilk adımda çözüm uzayında rastgele oluşturulan belirli sayıda birey kümesi ile arama yapmaya başlarlar. Bu nedenle ilk oluşturulan popülasyondaki bireylerin arama uzayındaki rastgele yerleri en iyi sonucu elde edebilmek için çok önemlidir. Rastgele oluşturulan ilk popülasyondaki bireylerin çoğunluğunun yerel minimumlar yakınında konumlanması durumunda optimum çözüme (genel minimum) yakınsama zorlaşabilir. Bu önemli sorunu ortadan kaldırmak için, bu tür algoritmalara ISL yapısı entegre edilerek, sisteme zamanla yeni bireylerin eklenmesi ile yerel minimum noktalara yakalanma riski azaltılabilmektedir. Popülasyon ilk olarak az sayıda bireyden oluşturulur bu durumda hem yerel minimumlardan kaçınılır hem de arama uzayı hakkında hızlı bir öğrenme gerçekleşir. Daha sonra popülasyona mevcut bireylerle farklı şekillerde iletişime geçirilerek oluşturulan yeni bireyler eklenir. Popülasyona ilave edilen bir birey, bir süre popülasyonda var olan diğer bireylerden sosyal öğrenmeyi gerçekleştirir. ISL'nin bu öğesi oldukça caziptir, çünkü sosyal öğrenme yoluyla yeni bireyler, bilgiyi ayrı ayrı edinmek için zaman harcamadan, daha tecrübeli bireylerden bilgiyi elde ederler. Böylece ISL yeni bireylere, yeni şeyler öğretmek için harcanacak zamandan tasarruf edilmesini sağlar.

Popülasyona yeni bir bireyin ilave edilmesinden sonra, popülasyonun yeni koşulları tekrar gözden geçirmesi gerekir, fakat onun bir parçası olan bireyler her şeyi yeni baştan öğrenmek zorunda kalmazlar [28-35].

Bu çalışmada DE algoritmasına, ISL yapısı eklenerek ISLDE algoritmaları geliştirilmiştir. ISLDE, daha önceki bölümde ayrıntılı olarak açıklandığı gibi popülasyondaki birey sayısının belirli aralıklarla artırılması prensibine dayanmaktadır. Böylece hem hızlı bir öğrenme hem de yerel minimumlardan kaçınmanın sağlanması amaçlanmıştır. Algoritmada belirli iterasyon aralıklarında (adım sayısı (step size), *SS*) arama uzayında yeni oluşturulan bir birey popülasyona eklenir. Bu durum belirlenen maksimum birey sayısına (NP_{max}) ulaşana kadar devam ettirilir. Maksimum sayıya ulaştıktan sonra kalan iterasyonlar tamamlanarak arama tamamlanır. Daha önce yapılan ISL çalışmalarında ya tek şekilde ya da en çok üç farklı şekilde birey ekleme yaklaşımı denenmiştir [30,32]. Bu çalışmada popülasyona birey eklemede beş farklı yaklaşım kullanılmıştır. Bunlar alt başlıklar halinde ayrıntılı şekilde aşağıda açıklanmıştır. Birey eklemede bu farklı yaklaşımların kullanılmasındaki amaç, değişik yapıdaki problemlere en uygun ISL yapısının belirlenmesidir. İlerleyen çalışmalarda, bu çalışmada kullanılanlardan başka yapılarında tasarlanabileceği öngörülmektedir.

2.3.1 *Yapı-1: ISLDE-1 (xRand)*

Birinci yapıda, çözüm uzayında aramaya belirlenen minimum birey sayısıyla başlanır. Belli aralıklarla arama uzayında rastgele oluşturulan yeni bir birey Denklem (5)'teki gibi popülasyona eklenerek birey sayısı artırılır. Bu işlem belirlenen maksimum birey sayısı tamamlanıncaya kadar devam eder.

$$x'_{j,New}(t) = x_{j,Rand}(t) \tag{5}$$

Denklemde yer alan $x'_{j,New}(t)$ *j*. iterasyonda popülasyona yeni eklenen bireyi, $x_{j,Rand}(t)$ *j*. iterasyonda arama uzayında rastgele oluşturulan bir bireyi göstermektedir [35].

2.3.2 *Yapı-2: ISLDE-2 (xPop)*

İkinci yapıda, popülasyona katılacak yeni birey, o anda popülasyonda yer alan bireyler arasından Denklem (6)'daki gibi rastgele seçilir.

$$x'_{j,New}(t) = x_{j,Pop}(t) \tag{6}$$

Denklemde $x_{j,Pop}(t)$ *j*. iterasyonda o anda popülasyonda bulunan ve rastgele seçilen bir bireyi ifade etmektedir [35].

2.3.3 *Yapı-3: ISLDE-3 (xBest)*

Üçüncü yapıda, o anda popülasyonda yer alan uygunluğu en yüksek olan bireyin aynısı Denklem (7)'deki gibi popülasyona eklenerek birey sayısı artırılır.

$$x'_{j,New}(t) = x_{j,Best}(t) \tag{7}$$

Denklemde $x_{j,Best}(t)$ *j*. iterasyonda popülasyondaki en iyi bireyi ifade etmektedir [35].

2.3.4 *Yapı-4: ISLDE-4 (xPop+xBest)*

Dördüncü yapıda, popülasyona eklenecek yeni birey, Denklem (8)'deki gibi, o anda popülasyondan rastgele seçilen bir birey, o anda en iyi uygunluğa sahip bireyle iletişime geçirilerek belirlenir. Bu yapı 2. ve 3. yapının birlikte kullanılması şeklinde tasarlanmıştır.

$$x'_{j,New}(t) = x_{j,Pop}(t) + rand[0,1]\left[x_{j,Best}(t) - x_{j,Pop}(t)\right] \tag{8}$$

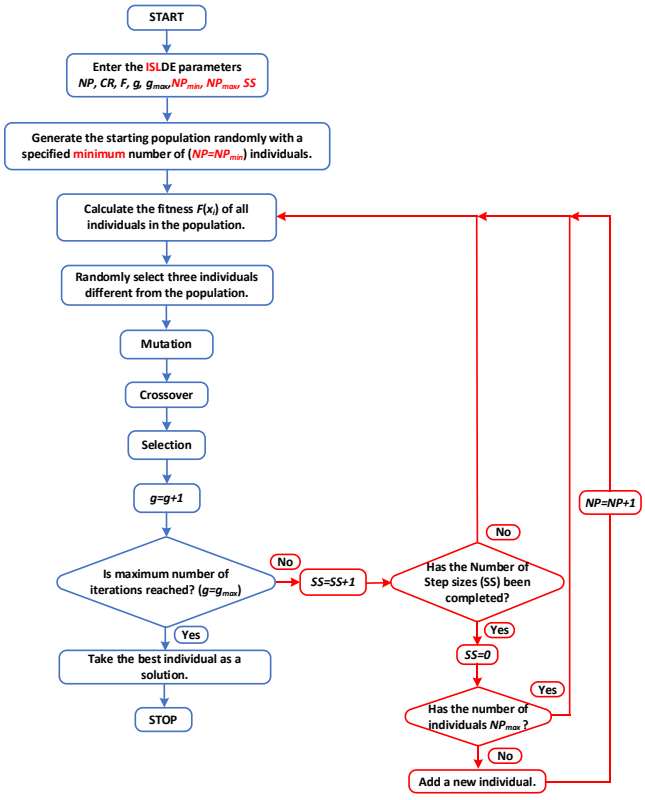
Denklemde *rand[0,1] 0-1* aralığında rastgele atanan bir sayıyı ifade etmektedir [35].

2.3.5 *Yapı-5: ISLDE-5 (xRand+xBest)*

Beşinci yapıda, popülasyondaki uygunluğu en yüksek bireyle iletişime geçecek birey, arama uzayı içinde rastgele oluşturulur ve Denklem (9)'a göre popülasyona eklenir. Bu yapı 1. ve 3. yapının birlikte kullanılması şeklinde tasarlanmıştır.

$$x'_{j,New}(t) = x_{j,Rand}(t) + rand[0,1]\left[x_{j,Best}(t) - x_{j,Rand}(t)\right] \tag{9}$$

Burada verilen yapıların kullanılması ile tasarlanan ISLDE algoritması için akış diyagramı Şekil 3'te verilmiştir. ISLDE algoritmasının klasik DE algoritmasından farkları kırmızı renkte gösterilmiştir [35].



Şekil 3. ISLDE akış diyagramı

3 AC yük akış analizi ve ekonomik güç dağıtımı problemi

3.1 AC yük akış analizi

Bir güç sisteminde en verimli çalışma şeklinin belirlenmesi için, bu güç sistemindeki her bir baranın gerilim genliğinin ve faz açısının hesaplanması yük akışı olarak tanımlanır. Her bir baraya ait bu bilgilerle güç sisteminde yer alan her bir iletim hattının taşıdığı aktif ve reaktif güçler ve iletim hattı kayıpları hesaplanabilir. Yük akışındaki bir diğer amaç ise salınım barası olarak belirlenen bara dışındaki tüm baraların aktif ve reaktif güçlerinin de belirlenebilmesidir. Mevcut sistem içinde eğer gerilim kontrollü bara mevcutsa, bu bara için de sabit tutulacak bara gerilim genliği belirlenir. Bu barada hesaplanması gereken reaktif güç üretimi ve bara gerilim açısı da çözümlerden elde edilir [37-40].

Sistemde yer alan bir k barasının geriliminin kutupsal koordinatlardaki ifadesi Denklem (10)'da verilmiştir [37-40].

$$V_k = |V_k| \angle \delta_k = |V_k| (\cos \delta_k + j \sin \delta_k) \tag{10}$$

Sistemin Y_{kn} bara matrisinin kutupsal koordinatlardaki ifadesi aşağıdaki gibi yazılır.

$$Y_{kn} = |Y_{kn}| \angle \theta_{kn} = |Y_{kn}| \cos \theta_{kn} + j |Y_{kn}| \sin \theta_{kn} = G_{kn} + jB_{kn} \tag{11}$$

Y_{bara} matrisi kullanılarak sistemdeki her bir k barası için enjekte edilen net akımlar Denklem (12)'deki gibi yazılır.

$$I_k = Y_{k1}V_1 + Y_{k2}V_2 + ... + Y_{kN}V_N = \sum_{n=1}^{N} Y_{kn}V_n \tag{12}$$

P_k ve Q_k, k barasından sisteme giren net aktif ve reaktif gücü gösterirken, k barasından sisteme enjekte edilen net aktif ve net reaktif güçler Denklem (13) ve (14)'ten hesaplanır [37].

$$P_k = |V_k| \sum_{n=1}^{N} |V_n| (G_{kn} \cos \delta_{kn} + B_{kn} \sin \delta_{kn}) \tag{13}$$

$$Q_k = |V_k| \sum_{n=1}^{N} |V_n| (G_{kn} \sin \delta_{kn} - B_{kn} \cos \delta_{kn}) \tag{14}$$

Denklem (13) ve (14)'teki P_k ve Q_k durum değişkenleri, $|V_k|$ ve δ_k'nın lineer olmayan fonksiyonlarıdır. Bu nedenle, güç akışı hesaplamaları lineer olmayan denklem sistemleri için iteratif çözüm yöntemlerinin kullanılmasını gerektirir. Dolayısıyla çalışmada Newton-Raphson metodunun kullanılması tercih edilmiştir. Newton-Raphson metodu güç akışı problemlerinin kutupsal formunu, her baradaki aktif ve reaktif güç farkları belli bir tolerans içinde kalana kadar çözümlemede kullanılır. Yöntemde devre teoremlerinden biri olan düğüm gerilimleri yöntemi esas alınır.

AC yük akışı analizinde her k barası için potansiyel olarak bilinmeyen değerler aktif güç P_k, reaktif güç Q_k, gerilim açısı δ_k ve gerilim genliği $|V_k|$'dır. Her k barasının türüne göre P_k, Q_k, δ_k ve $|V_k|$ değerlerinden ikisi tanımlanır ve geri kalan diğer ikisi hesaplanır. Güç akışı problemlerinin çözümünde amaç, P_k ve Q_k değerleri ile hesaplanmış değerler arasındaki fark sıfıra yaklaştırılırken bilinmeyen iki değerin bulunmasıdır [37-40].

Bara gerilim büyüklükleri $|V_k|$ ve açıları δ_k güç akışı çalışmalarında giriş bilinmeyenleridir, sahip oldukları değerlere göre sistemin durumlarını belirledikleri için durum ya da matematiksel açıdan bakılırsa bağımsız değişkenlerdir. Bu durumda güç akışı problemi, giriş verilerini esas alarak eşit miktarda güç akışı denklemi kullanarak tüm durum değişkenlerinin değerlerinin bulunması olarak da tanımlanabilir. Eğer N_g tane gerilim kontrollü bara (salınım barası dışında) varsa ($2N\text{-}N_g\text{-}2$) adet durum değişkeni için çözülmesi gereken ($2N\text{-}N_g\text{-}2$) adet denklem bulunmaktadır. Durum değişkenlerinin değerleri hesaplandıktan sonra sistemin tüm durumu bilinmektedir ve durum değişkenlerine bağlı tüm değerler hesaplanabilir.

Sistemde yer alan k. barayı n. baraya bağlayan iletim hattındaki aktif güç (P_{kn}), reaktif güç (Q_{kn}), baraların gerilim genlikleri ($|V_k|$, $|V_n|$) ve bara açılarının (δ_k, δ_n), Newton-Raphson yöntemi sonucunda elde edilen değerleri Denklem (15) ve (16)'da yer alan formüllerle hesaplanır [37-40].

$$P_{kn} = G_{kn} |V_k|^2 - |V_k||V_n| (G_{kn} \cos \delta_{kn} + B_{kn} \sin \delta_{kn}) \tag{15}$$

$$Q_{kn} = |V_k|^2 \left(\frac{B_{kn}^{'}}{2} - B_{kn}\right) + |V_k||V_n| (B_{kn} \cos \delta_{kn} - G_{kn} \sin \delta_{kn}) \tag{16}$$

Burada P_{kn} ve Q_{kn}, n. baraya k. baradan gönderilen sırasıyla aktif ve reaktif güçlerin k. bara sınırındaki değerleridir. Bir güç sistemi için bu değerler hesaplandıktan sonra ekonomik güç dağıtımı yapılabilir.

3.2 Konveks ve konveks olmayan ekonomik güç dağıtımı problemi

EPD problemi, bir güç sisteminin en ekonomik şekilde işletilebilmesinin temelini oluşturmaktadır. Güç sistemi işletiminin temelini ise sistemin güvenirliliğini korumanın yanında, talep edilen gücü en düşük maliyetle üretebilmek oluşturmaktadır. EPD probleminin çözümü, sistemdeki bütün üretim birimleri için belirlenen yakıt maliyeti fonksiyonlarına bağlıdır [41]. Bu yakıt maliyetleri üretim birimlerinin kullandığı fosil kaynaklı yakıtlara bağlı olarak değişmektedir. Literatürde yakıt maliyeti fonksiyonları için iki farklı yapı sıklıkla kullanılmaktadır. Bunlardan ilki sistemdeki üretim birimlerinin valf noktası etkilerinin ihmal edildiği durumlarda kullanılan ve problemin konveks yapıda olduğu yakıt maliyeti fonksiyonlarıdır. Bu fonksiyon her bir üretim birimi için aktif güç çıkışlarının 2. derece fonksiyonu olarak Denklem (17)'deki gibi alınmıştır. Bu durumda çözümü yapılan problem konveks ekonomik güç dağıtımı (Convex EPD - cEPD) olarak adlandırılmıştır.

$$F_n(P_{G,n}) = a_n + b_n P_{G,n} + c_n P_{G,n}^2, \quad (\$/h) \tag{17}$$

$F_n(P_{G,n})$ sistemdeki n. üretim birimine ait yakıt maliyeti değeridir.

Problemin çözümü yapılırken, güç sisteminde yer alan üretim birimlerinin valf noktası etkileri de dikkate alınacak

ise, fonksiyon konveks olmayan bir hale gelir ve Denklem (18)'deki gibi kullanılmalıdır. Bu durumda çözümü yapılan problem konveks olmayan ekonomik güç dağıtımı (Non-convex EPD - ncEPD) halini alır. Optimizasyon algoritmaları ile ncEPD probleminin optimal sonucuna ulaşmak, cEPD problemine göre daha zordur [2, 37].

$$F_n(P_{G,n}) = a_n + b_n P_{G,n} + c_n P_{G,n}^2 + \left| e_n . \sin\left(f_n \left(P_{G,n}^{\min} - P_{G,n} \right) \right) \right|, \quad (\$/h) \tag{18}$$

Denklem (17) ve (18)'de verilen değişkenlerden ($P_{G,n}$) her bir *n.* üretim biriminin aktif güç çıkış değeri olmakla birlikte birimi *MW* olarak alınmaktadır. Hesaplama kolaylığı için *pu* dönüşümler, çözüm aşamasında yapılmaktadır. a_n, b_n, c_n, e_n ve f_n ise *n.* üretim birimine ait sabit katsayılardır.

cEPD ve ncEPD problemlerinin çözümü, sistemin belirlenen bütün kısıtları altında belirlenen amaç fonksiyonunun minimize edilmesi şeklindedir. Problemlerin çözümünde amaç fonksiyonu olarak sistemdeki bütün üretim birimlerinin minimum toplam yakıt maliyeti değerlerinin toplamını ifade eden (Total Fuel Cost – *TFC*) alınmış ve Denklem (19)'da verilmiştir.

$$TFC = \min \sum_{n=1}^{N_G} F_n(P_{G,n}) \ \left(n \in N_G\right), (\$/h) \tag{19}$$

N_G sistemde yer alan üretim birimi sayısını göstermektedir. Literatürde EPD problemlerinin çözümünde genellikle güç dağıtımı sırasında iletim hatlarında meydana gelen kayıplar ya ihmal edilmekte ya da *B* kayıp matrisleri ile yaklaşık olarak hesaplanarak probleme dahil edilmektedir. Bu durumda elde edilen sonuçlar da yaklaşık olmaktadır. Bu çalışmada iletim hattı kayıpları AC yük akışı yapılarak hesaplanmış ve çözüme dahil edilmiştir. Sistemde sağlanması gereken aktif ve reaktif güç denge kısıtları Denklem (20) ve (21)'deki gibi alınmıştır.

$$P_{load} + P_{loss} - \sum_{n=1}^{N_G} (P_{G,n}) = 0, \quad \left(n \in N_G\right) \tag{20}$$

$$Q_{load} + Q_{loss} - \sum_{n=1}^{N_G} (Q_{G,n}) = 0, \quad \left(n \in N_G\right) \tag{21}$$

Denklemde P_{load} ve Q_{load} sistemde talep edilen toplam aktif ve reaktif yükü, P_{loss} ve Q_{loss} güç dağıtımında iletim hatlarında meydana gelen toplam aktif ve reaktif güç kayıplarını göstermektedir. ($Q_{G,n}$) ise her bir *n.* üretim biriminin reaktif güç çıkış değeri olmakla birlikte birimi *MVAr* olarak alınmaktadır.

Sistemde yer alan güç üretim birimlerinin üretebileceği minimum ve maksimum aktif ve reaktif güç üretimi değerleri ise Denklem (22) ve (23)'de verilmiştir.

$$P_{G,n}^{\min} \le P_{G,n} \le P_{G,n}^{\max}, \quad \left(n \in N_G\right) \tag{22}$$

$$Q_{G,n}^{\min} \le P_{G,n} \le Q_{G,n}^{\max}, \quad \left(n \in N_G\right) \tag{23}$$

4 Problem çözümleri

Beş farklı ISLDE yapısı, cEPD ve ncEPD probleminin çözümü için modifiye edilmiş IEEE 118 baralı test sistemine ayrı ayrı uygulanmıştır. Şekil A1'de tek hat diyagramı verilen modifiye edilmiş sistem 118 bara, 179 iletim hattı, 54 termik üretim birimi ve 91 yük barasından oluşmaktadır. Sistemin yük baralarında toplam *42.42 pu* aktif yük (P_{load}) ve *14.38 pu* reaktif yük (Q_{load}) bulunmaktadır. Bütün veriler *pu* olarak verilmiş ve baz değerleri S_{base}*=100 MVA*, U_{base}*= 230 kV* ve Z_{base}*=529 Ω* olarak alınmıştır. Sistemde 69 nolu bara salınım barası olarak belirlenmiş ve bara gerilimi $1.035\angle 0^o$ *V* olarak alınmıştır [40, 42].

Örnek test sistemi literatürde büyük boyutlu test sistemleri arasında yer almakla birlikte, birçok farklı çalışmada farklı değişken ve kısıtlar altında çözülmüştür. Bu çalışmalardan çoğu ya kayıplar ihmal edilerek ya da B kayıp matrisleri kullanılarak çözülmüştür. Bu çalışmadaki farklı iki durum için sistemin iletim hattı kayıpları dikkate alınarak yapılan çözümlerde P_{loss} bölüm 3.1'de ayrıntıları verilen yük akışı analizi sonucunda hesaplanmıştır. AC yük akışı metoduyla yapılacak çözümler için sistem modifiye edilmiş ve sistemin çözümü için gerekli bütün veriler çalışmanın ek kısmında verilmiştir. Bunlardan sistemin nominal π eşdeğer devresine ait *R*, *X*, *B* değerleri Tablo A1'de, aktif ve reaktif yük değerleri Tablo A2'de, AC yük akışı başlangıç değerleri Tablo A3'de, üretim birimlerine ait işletim limitleri Tablo A4'de ve konveks ve konveks olmayan yakıt maliyeti fonksiyonlarına ait katsayılar Tablo A5'de verilmiştir. cEPDve ncEPD problemlerinin klasik DE, geliştirilen ISLDE-1, ISLDE-2, ISLDE-3, ISLDE-4 ve ISLDE-5 algoritmalarıyla çözümü, MATLAB R2022a'da geliştirilen programla 30 kez yapılmıştır. Programlar 2xIntel Xeon E5-2637 v4 3.50 GHZ x64 işlemci ve 512 GB ram bellekli iş istasyonunda koşturulmuştur.

Çözümler yapılırken kullanılan algoritmalara ve problemlere ait parametre değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1'de yer alan *CR* çaprazlama oranı, *F* ölçekleme faktörü, *PopSize* sabit popülasyondaki birey sayısı, *PopMin* ve *PopMax* artırımlı öğrenme kavramı eklenen algoritmalar için aramaya başlanan popülasyondaki minimum ve maksimum birey sayıları, *SS* popülasyona yeni birey eklenecek adım sayısı, *fcall* her algoritma için fonksiyon çağırım sayısı, *IteN* iterasyon sayısı, *Run* problemin kaç kez çalıştırıldığını gösteren algoritma parametreleridir. CPF_{slack} salınım barası ceza katsayısını ve ε ise iteratif işlemler için kabul edilebilir hata oranını göstermektedir.

Tablo 1. Algoritma ve problemlere ait parametre değerleri

DE	***CR***	***F***	***PopSize***	***fcall***
	0.9	0.5	50	
ISLDE	***PopMin***	***PopMax***	***SS***	25000 (***IteN***: 500)
	30	59	2	
cEPD	CPF_{slack}		***ε***	***Run***
ncEPD	1e5		1e-5	30
$P_{yük}$ ***(pu)***	42,42		$Q_{yük}$ ***(pu)***	14,38
S_{baz}	100 MVA	U_{baz}	230 kV	Z_{baz} 529 Ω

4.1 Durum-1: Konveks ekonomik güç dağıtım problemi (cEPD)

İlk olarak, örnek güç sisteminin, Denklem (17)'de verilen konveks yakıt maliyeti fonksiyonu ile çözümü yapılmıştır. Örnek problem 6 farklı algoritma ile 30'ar kez çözülmüştür. Bu çalışmalardan eniyi yakıt maliyetinin elde edildiği çözüme ait aktif güç üretim değerleri Tablo 2'de, reaktif güç üretim değerleri Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 2. Eniyi yakıt maliyetlerinin elde edildiği aktif güç değerleri (cEPD)

Gen. Units (54)		***DE***	***ISLDE-1***	***ISLDE-2***	***ISLDE-3***	***ISLDE-4***	***ISLDE-5***
		Run:3	***Run:21***	***Run:8***	***Run:19***	***Run:18***	***Run:21***
1	$P_{G,1}$	0.003030	0.008282	0.005805	0.004438	0.002147	0.025486
4	$P_{G,4}$	0.581459	0.622219	0.603355	0.607409	0.609370	0.612427
6	$P_{G,6}$	0.390629	0.351176	0.345975	0.362774	0.363878	0.372219
8	$P_{G,8}$	0.501430	0.519644	0.540376	0.542814	0.514790	0.540330
10	$P_{G,10}$	1.000000	0.999975	0.999993	0.999985	0.999907	0.999977
12	$P_{G,12}$	0.857229	0.857174	0.861018	0.865030	0.865754	0.862109
15	$P_{G,15}$	0.748305	0.723548	0.724239	0.735142	0.741274	0.712131
18	$P_{G,18}$	0.551277	0.561287	0.546651	0.534305	0.545235	0.532864
19	$P_{G,19}$	0.417273	0.416510	0.439446	0.419550	0.402181	0.437486
24	$P_{G,24}$	0.472998	0.462366	0.476447	0.445641	0.477755	0.449151
25	$P_{G,25}$	1.000000	0.999934	1.000000	0.999997	0.999813	0.999806
26	$P_{G,26}$	2.972836	2.981312	2.977438	2.965153	2.984790	2.966378
27	$P_{G,27}$	0.000109	0.000143	0.000289	0.000162	0.000243	0.000733
31	$P_{G,31}$	0.072779	0.076555	0.071105	0.075233	0.071461	0.074839
32	$P_{G,32}$	0.472468	0.484184	0.479749	0.474550	0.444985	0.478037
34	$P_{G,34}$	0.344265	0.371901	0.335040	0.352503	0.380900	0.380685
36	$P_{G,36}$	0.428633	0.395242	0.424485	0.400064	0.398648	0.384742
40	$P_{G,40}$	0.408765	0.425493	0.395039	0.435988	0.434025	0.423415
42	$P_{G,42}$	0.850157	0.858011	0.852499	0.861182	0.839418	0.872137
46	$P_{G,46}$	0.210651	0.210323	0.209282	0.211846	0.213369	0.212290
49	$P_{G,49}$	1.189907	1.189960	1.189944	1.189958	1.190000	1.189897
54	$P_{G,54}$	0.486494	0.489234	0.491058	0.484825	0.492310	0.488354
55	$P_{G,4}$	0.562414	0.554305	0.583081	0.575392	0.562946	0.564219
56	$P_{G,4}$	0.535583	0.539536	0.527837	0.530950	0.543672	0.517357
59	$P_{G,59}$	0.999825	0.999848	0.999911	1.000000	0.999941	0.999752
61	$P_{G,61}$	1.632419	1.646580	1.634710	1.651765	1.626452	1.645002
62	$P_{G,62}$	0.000077	0.005356	0.017421	0.001672	0.027311	0.034983
65	$P_{G,65}$	0.999983	0.999875	0.999940	0.999912	0.999879	0.999870
66	$P_{G,66}$	3.824834	3.814763	3.806596	3.821532	3.794852	3.798397
69	$P_{G,69,slack}$	4.909827	4.911128	4.913114	4.904699	4.912257	4.886089
	$Q_{G,69,slack}$	1.980540	1.981212	1.981939	1.981768	1.981876	1.982492
70	$P_{G,70}$	0.218192	0.187581	0.188470	0.185856	0.203004	0.200736
72	$P_{G,72}$	0.000648	0.009652	0.019424	0.004077	0.008521	0.028720
73	$P_{G,73}$	0.116756	0.131840	0.127842	0.155259	0.131349	0.124730
74	$P_{G,74}$	0.442848	0.470533	0.450851	0.446960	0.443004	0.475703
76	$P_{G,76}$	0.483133	0.436416	0.480129	0.493066	0.470313	0.457764
77	$P_{G,4}$	0.080597	0.100616	0.067606	0.056958	0.087241	0.086732
80	$P_{G,80}$	4.603383	4.618659	4.621976	4.594417	4.620694	4.618903
85	$P_{G,85}$	0.000232	0.001037	0.000139	0.000519	0.000013	0.000821
87	$P_{G,87}$	0.037648	0.036391	0.037757	0.037649	0.037253	0.038102
89	$P_{G,89}$	5.102846	5.090106	5.096419	5.101871	5.111316	5.080062
90	$P_{G,90}$	0.000150	0.000125	0.000344	0.000000	0.001304	0.000052
91	$P_{G,91}$	0.000362	0.000015	0.000890	0.000576	0.000368	0.000752
92	$P_{G,92}$	0.000457	0.000193	0.000139	0.000000	0.000982	0.000195
99	$P_{G,99}$	0.001054	0.000000	0.001056	0.006041	0.000685	0.001900
100	$P_{G,100}$	2.396569	2.377707	2.380920	2.378519	2.375649	2.381040
103	$P_{G,103}$	0.388724	0.387338	0.390146	0.390592	0.391860	0.392927
104	$P_{G,104}$	0.045111	0.066262	0.084715	0.068761	0.030990	0.048936
105	$P_{G,105}$	0.133498	0.137232	0.100926	0.141670	0.153197	0.145238
107	$P_{G,107}$	0.357374	0.349866	0.348173	0.335778	0.339044	0.350364
110	$P_{G,110}$	0.121018	0.108595	0.125774	0.134593	0.100725	0.115357
111	$P_{G,111}$	0.356306	0.354574	0.351418	0.353746	0.353218	0.350840
112	$P_{G,112}$	0.445679	0.442686	0.432902	0.412021	0.468177	0.432534
113	$P_{G,113}$	0.288035	0.259964	0.285679	0.287117	0.275761	0.249758
116	$P_{G,116}$	0.000112	0.002065	0.000311	0.004477	0.002984	0.000232
Toplam P_{gen} (pu)		43.046389	43.045320	43.045850	43.044995	43.047216	43.043557
P_{loss} (pu)		0.626389	0.625321	0.625850	0.624995	0.627216	0.623557
TFC ($/h)		135193.313325	135193.671100	135193.225528	135193.697742	135194.224591	135194.795624
CPU Time (s)		1486.87	1481.79	1554.13	1620.17	1590.11	1419.18

Tablo 3. Eniyi yakıt maliyetlerinin elde edildiği reaktif güç değerleri (cEPD)

Gen. Units (54)		*DE*	*ISLDE-1*	*ISLDE-2*	*ISLDE-3*	*ISLDE-4*	*ISLDE-5*
		Run:3	*Run:21*	*Run:8*	*Run:19*	*Run:18*	*Run:21*
1	$Q_{G,1}$	1.514461	1.512738	1.513071	1.513246	1.514635	1.512119
4	$Q_{G,4}$	-0.195786	-0.207230	-0.201957	-0.203040	-0.203623	-0.204516
6	$Q_{G,6}$	0.030837	0.039191	0.040206	0.037797	0.036653	0.035081
8	$Q_{G,8}$	0.069556	0.065188	0.060365	0.060028	0.066372	0.060608
10	$Q_{G,10}$	-1.400456	-1.399515	-1.399901	-1.401045	-1.399423	-1.400136
12	$Q_{G,12}$	-0.782597	-0.782595	-0.782716	-0.782840	-0.782863	-0.782750
15	$Q_{G,15}$	0.962938	0.970112	0.969316	0.965941	0.964733	0.972923
18	$Q_{G,18}$	0.016632	0.013669	0.018519	0.020981	0.017823	0.021594
19	$Q_{G,19}$	0.264615	0.264977	0.259490	0.263983	0.267894	0.259500
24	$Q_{G,24}$	-0.284179	-0.281122	-0.285791	-0.276735	-0.285048	-0.278037
25	$Q_{G,25}$	-0.340234	-0.338296	-0.339041	-0.339643	-0.339216	-0.339470
26	$Q_{G,26}$	1.741104	1.742009	1.741207	1.741645	1.741492	1.743680
27	$Q_{G,27}$	-1.435481	-1.434525	-1.435370	-1.435533	-1.434692	-1.434612
31	$Q_{G,31}$	-0.041650	-0.043065	-0.041179	-0.042541	-0.040780	-0.042603
32	$Q_{G,32}$	0.234729	0.231404	0.232604	0.234022	0.243017	0.233127
34	$Q_{G,34}$	-0.291062	-0.299385	-0.288253	-0.293522	-0.301231	-0.301283
36	$Q_{G,36}$	0.154513	0.163827	0.154840	0.162955	0.162821	0.166587
40	$Q_{G,40}$	0.008558	0.003367	0.012412	0.000407	0.000920	0.003835
42	$Q_{G,42}$	0.024517	0.021770	0.023594	0.020763	0.027740	0.016871
46	$Q_{G,46}$	0.285586	0.285658	0.286061	0.285111	0.284821	0.284940
49	$Q_{G,49}$	-0.155953	-0.155891	-0.155854	-0.155974	-0.155796	-0.155770
54	$Q_{G,54}$	1.515017	1.513876	1.513424	1.514127	1.513757	1.513555
55	$Q_{G,4}$	-0.009379	-0.007185	-0.015273	-0.013185	-0.009618	-0.009915
56	$Q_{G,4}$	-0.104196	-0.105440	-0.101867	-0.102859	-0.106567	-0.098957
59	$Q_{G,59}$	-0.383861	-0.383626	-0.384549	-0.384344	-0.383989	-0.383754
61	$Q_{G,61}$	1.201969	1.199033	1.201870	1.198452	1.203267	1.198621
62	$Q_{G,62}$	-0.136804	-0.137731	-0.139118	-0.137591	-0.140171	-0.141608
65	$Q_{G,65}$	-0.198396	-0.198604	-0.198760	-0.198735	-0.198834	-0.199320
66	$Q_{G,66}$	-2.832757	-2.832891	-2.833108	-2.833774	-2.832301	-2.832745
69	$P_{G,69,slack}$	4.909827	4.911128	4.913114	4.904699	4.912257	4.886089
	$Q_{G,69,slack}$	1.980540	1.981212	1.981939	1.981768	1.981876	1.982492
70	$Q_{G,70}$	-0.093181	-0.086213	-0.086160	-0.086179	-0.090046	-0.088969
72	$Q_{G,72}$	-0.101474	-0.103492	-0.106089	-0.102713	-0.103474	-0.108638
73	$Q_{G,73}$	0.072178	0.069199	0.070096	0.064248	0.069243	0.070793
74	$Q_{G,74}$	-0.126676	-0.134961	-0.129149	-0.128059	-0.126590	-0.136887
76	$Q_{G,76}$	-0.128133	-0.113559	-0.127347	-0.131536	-0.124113	-0.120625
77	$Q_{G,4}$	0.277415	0.271324	0.280597	0.283182	0.275375	0.273755
80	$Q_{G,80}$	2.258230	2.252616	2.250818	2.254689	2.253926	2.252668
85	$Q_{G,85}$	0.033076	0.032697	0.032805	0.032809	0.033077	0.032438
87	$Q_{G,87}$	0.110681	0.110931	0.110660	0.110681	0.110759	0.110591
89	$Q_{G,89}$	0.040170	0.041295	0.040576	0.039998	0.039066	0.042227
90	$Q_{G,90}$	0.587706	0.587685	0.587620	0.587770	0.587354	0.587662
91	$Q_{G,91}$	-0.129090	-0.128957	-0.129254	-0.129165	-0.129136	-0.129168
92	$Q_{G,92}$	-0.218742	-0.219542	-0.218992	-0.218616	-0.218133	-0.220052
99	$Q_{G,99}$	-0.175502	-0.175366	-0.175643	-0.176831	-0.175520	-0.175870
100	$Q_{G,100}$	0.922698	0.925806	0.925463	0.926123	0.927850	0.924772
103	$Q_{G,103}$	0.651543	0.652939	0.652483	0.652711	0.651000	0.652137
104	$Q_{G,104}$	-0.010593	-0.016394	-0.020954	-0.016904	-0.006641	-0.011593
105	$Q_{G,105}$	-0.060596	-0.062487	-0.051461	-0.063426	-0.065498	-0.064694
107	$Q_{G,107}$	-0.001453	0.000823	0.001403	0.005149	0.004145	0.000696
110	$Q_{G,110}$	0.029295	0.032958	0.026759	0.023111	0.036715	0.030164
111	$Q_{G,111}$	-0.017475	-0.017024	-0.016199	-0.016807	-0.016670	-0.016048
112	$Q_{G,112}$	0.224116	0.225337	0.229336	0.237899	0.214960	0.229486
113	$Q_{G,113}$	0.148658	0.157596	0.149749	0.148373	0.151950	0.159753
116	$Q_{G,116}$	-1.593612	-1.593169	-1.592542	-1.592532	-1.593842	-1.595205
Toplam Q_{gen} (pu)		4.112020	4.110974	4.110756	4.103838	4.119428	4.099454
Q_{loss} (pu)		-10.267980	-10.269026	-10.269244	-10.276162	-10.260572	-10.280546

Tablo 1 incelendiğinde bütün algoritmaların 30 çalışma için eniyi çözüm bakımından benzer yakıt maliyeti değerlerini en az bir koşturmada yakaladığı görülmektedir. Eniyi maliyet değeri *135193.225528 $/h* olarak ISLDE-3 algoritması ile elde edilirken, süre bakımından en hızlı algoritma *1433.288900 s* ile ISLDE-5 algoritması olmuştur. Algoritmaların birbirlerine olan üstünlükleri ve kararlılıklarının daha belirgin incelenebilmesi için, 30 çalışmanın tamamında elde edilen istatistiki değerler Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. 30 çalışmaya ait istatistiki değerler (cEPD)

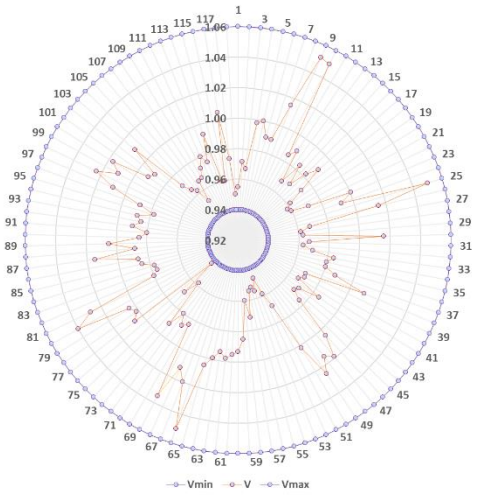
	DE	ISLDE-1	ISLDE-2	ISLDE-3	ISLDE-4	ISLDE-5
Eniyi	135193.31332 (Run: 3)	135193.671100 (Run: 21)	135193.225528 (Run: 8)	135193.697742 (Run: 19)	135194.224591 (Run: 18)	135194.795624 (Run: 21)
Ortalama	135200.186155	135207.725988	135200.609906	135200.635062	135205.258781	135204.016180
Enkötü	135300.504310 (Run: 29)	135304.164358 (Run: 26)	135217.101768 (Run: 3)	135252.224546 (Run: 16)	135262.641324 (Run: 21)	135250.448091 (Run: 24)
StdSapma	19.919008	24.208178	5.863443	11.738140	16.479825	13.726839
Toplam süre (s)	44606.1	44453.7	46623.9	48605.1	47703.3	42575.4
Ortalama süre (s)	1486.87	1481.79	1554.13	1620.17	1590.11	1419.18

Tablo 4 incelendiğinde bütün algoritmaların 30 çalışma için eniyi çözüm bakımından benzer yakıt maliyeti değerlerini yakalamasına rağmen, enkötü yakıt maliyeti değerleri farklılıklar göstermektedir. 30 çalışmada elde edilen standart sapma değerlerine bakıldığında en kararlı algoritmanın ISLDE-2 olduğu görülmüştür. En kararsız yapı ise ISLDE-1 olmuştur. Diğer bütün yapılar klasik DE'ye göre daha kararlı hale gelmesine rağmen ISLDE-1'de kararlılığın klasik algoritmaya göre iyileştirilemediği görülmüştür.

Klasik algoritma ile 30 çalışmada elde edilen eniyi yakıt maliyeti değerleri ile artırımlı sosyal öğrenme yapılarından eniyi yakıt maliyetini elde eden ISLDE-2 algoritmasının 30 çalışmada elde ettiği değerler Şekil 4'te verilmiştir.

Bütün sonuçlar arasında eniyi yakıt maliyeti değerinin bulunduğu durum için (ISLDE-2, Run:8) sistemdeki bara gerilim değerlerinin grafiği ise Şekil 5'te verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere bütün bara gerilimleri verilen alt (*0.94 pu*) ve üst (*1.06 pu*) gerilim değerleri arasında yer almaktadır. Örnek istemde yer alan 54 adet üretim birimi bulunan baraların tamamı gerilim kontrollü baralar olduğundan, bara gerilim değerleri yük akışı süresince değişmemiştir.

Şekil 4. 30 çalışmada elde edilen TFC değerleri (cEPD)



Şekil 5. ISLDE-2, Run:8 için bara gerilim değerleri (cEPD)

Tablo 5. Eniyi yakıt maliyetlerinin elde edildiği aktif güç değerleri (ncEPD)

Gen. Units (54)		***DE***	***ISLDE-1***	***ISLDE-2***	***ISLDE-3***	***ISLDE-4***	***ISLDE-5***
		Run:3	***Run:21***	***Run:8***	***Run:19***	***Run:18***	***Run:21***
1	$P_{G,1}$	0.020233	0.013516	0.053304	0.019987	0.015033	0.008603
4	$P_{G,4}$	0.602811	0.611273	0.595530	0.594973	0.614478	0.601310
6	$P_{G,6}$	0.343537	0.327649	0.360615	0.367387	0.353431	0.368240
8	$P_{G,8}$	0.555812	0.536222	0.524947	0.540550	0.516331	0.544016
10	$P_{G,10}$	0.999975	0.999997	0.999841	0.999790	0.999953	0.999969
12	$P_{G,12}$	0.865406	0.866332	0.864918	0.859925	0.856872	0.867119
15	$P_{G,15}$	0.713991	0.742797	0.725200	0.748896	0.747963	0.695074
18	$P_{G,18}$	0.552194	0.564791	0.579745	0.536473	0.522264	0.579057
19	$P_{G,19}$	0.466842	0.448201	0.420486	0.427790	0.453354	0.449672
24	$P_{G,24}$	0.373946	0.374040	0.374209	0.374099	0.374143	0.374047
25	$P_{G,25}$	0.999866	0.999873	0.999924	0.999820	0.999534	0.999883
26	$P_{G,26}$	2.981134	2.979839	2.984140	2.997292	2.966015	2.993874
27	$P_{G,27}$	0.000092	0.000470	0.000464	0.006169	0.000186	0.001206
31	$P_{G,31}$	0.075855	0.073152	0.075071	0.074839	0.075290	0.072265
32	$P_{G,32}$	0.489654	0.486884	0.484027	0.478186	0.485066	0.490434
34	$P_{G,34}$	0.349158	0.356726	0.397371	0.345004	0.365889	0.346106
36	$P_{G,36}$	0.429752	0.438333	0.386438	0.414613	0.401957	0.415974
40	$P_{G,40}$	0.426511	0.384459	0.458007	0.458699	0.395568	0.431026
42	$P_{G,42}$	0.851579	0.861067	0.822191	0.911805	0.855469	0.851213
46	$P_{G,46}$	0.211175	0.215633	0.204962	0.213853	0.215595	0.211330
49	$P_{G,49}$	1.189946	1.189866	1.189840	1.189399	1.190000	1.189843
54	$P_{G,54}$	0.490074	0.487379	0.491729	0.485259	0.496491	0.495052
55	$P_{G,4}$	0.588829	0.607269	0.574389	0.550112	0.581012	0.569814
56	$P_{G,4}$	0.541914	0.500998	0.535061	0.537363	0.536147	0.542884
59	$P_{G,59}$	0.999890	0.999830	0.999746	0.999909	0.999819	0.999859
61	$P_{G,61}$	1.637129	1.649309	1.641796	1.642601	1.659123	1.648520
62	$P_{G,62}$	0.020210	0.027374	0.050164	0.014838	0.045341	0.013844
65	$P_{G,65}$	0.999872	0.999975	0.999171	0.999983	1.000000	0.999960
66	$P_{G,66}$	3.820232	3.824222	3.825081	3.793955	3.795937	3.817253
69	$P_{G,69,slack}$	4.909298	4.918238	4.885018	4.915800	4.919740	4.920000
	$Q_{G,69,slack}$	1.982924	1.982504	1.983084	1.982553	1.983903	1.982534
70	$P_{G,70}$	0.237508	0.229323	0.190460	0.199557	0.242158	0.205405
72	$P_{G,72}$	0.001259	0.005183	0.015419	0.008855	0.020676	0.002722
73	$P_{G,73}$	0.092138	0.103192	0.140774	0.109927	0.137868	0.144895
74	$P_{G,74}$	0.466639	0.463560	0.435085	0.486981	0.426663	0.460495
76	$P_{G,76}$	0.505403	0.486815	0.484697	0.483494	0.502348	0.480199
77	$P_{G,4}$	0.000065	0.000000	0.000223	0.000059	0.000018	0.000352
80	$P_{G,80}$	4.622009	4.629688	4.641244	4.622224	4.626210	4.641566
85	$P_{G,85}$	0.000175	0.000598	0.000000	0.000789	0.000433	0.000310
87	$P_{G,87}$	0.037936	0.038412	0.037706	0.037832	0.036840	0.038018
89	$P_{G,89}$	5.141390	5.112189	5.131071	5.135713	5.128482	5.124341
90	$P_{G,90}$	0.000404	0.000110	0.000179	0.000035	0.001564	0.000483
91	$P_{G,91}$	0.000322	0.000253	0.002223	0.000973	0.001226	0.000503
92	$P_{G,92}$	0.000119	0.000017	0.000212	0.000048	0.000081	0.000168
99	$P_{G,99}$	0.000006	0.000000	0.000364	0.000330	0.000095	0.000025
100	$P_{G,100}$	2.244007	2.243954	2.244764	2.244184	2.244373	2.244052
103	$P_{G,103}$	0.387889	0.392992	0.396861	0.391625	0.389291	0.393248
104	$P_{G,104}$	0.072895	0.097434	0.052191	0.080951	0.062409	0.072383
105	$P_{G,105}$	0.167477	0.173017	0.143703	0.137138	0.165172	0.168852
107	$P_{G,107}$	0.347557	0.354454	0.359927	0.383654	0.365555	0.355235
110	$P_{G,110}$	0.139730	0.134696	0.169385	0.130369	0.157757	0.125287
111	$P_{G,111}$	0.354380	0.354228	0.352247	0.355275	0.354487	0.350973
112	$P_{G,112}$	0.437964	0.433284	0.423591	0.438320	0.422125	0.439725
113	$P_{G,113}$	0.277797	0.303456	0.310493	0.291246	0.318184	0.297107
116	$P_{G,116}$	0.002422	0.000056	0.010937	0.004171	0.002316	0.001348
Toplam P_{gen} (pu)		43.046389	43.044406	43.042624	43.047144	43.043123	43.044329
P_{loss} (pu)		0.626389	0.624406	0.622624	0.627144	0.623123	0.624329
TFC ($/h)		135193.313325	135411.228474	135411.362343	135415.637539	135414.267529	135413.386380
CPU Time (s)		1486.87	1478.361762	1511.226445	1574.009588	1417.238985	1669.336020

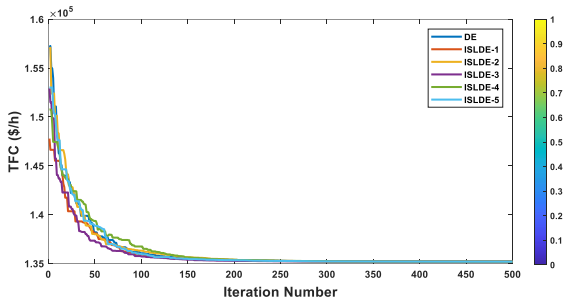
Tablo 6. Eniyi yakıt maliyetlerinin elde edildiği reaktif güç değerleri (ncEPD)

Gen. Units (54)		*DE*	*ISLDE-1*	*ISLDE-2*	*ISLDE-3*	*ISLDE-4*	*ISLDE-5*
		Run:3	*Run:21*	*Run:8*	*Run:19*	*Run:18*	*Run:21*
1	$Q_{G,1}$	1.509595	1.509610	1.500998	1.509593	1.511095	1.510656
4	$Q_{G,4}$	-0.201871	-0.204160	-0.199834	-0.199554	-0.205044	-0.201506
6	$Q_{G,6}$	0.039930	0.043827	0.035919	0.036561	0.038767	0.034266
8	$Q_{G,8}$	0.056746	0.061175	0.063867	0.060525	0.065943	0.059571
10	$Q_{G,10}$	-1.398828	-1.398571	-1.397704	-1.400936	-1.398958	-1.398713
12	$Q_{G,12}$	-0.782852	-0.782880	-0.782837	-0.782681	-0.782586	-0.782905
15	$Q_{G,15}$	0.971787	0.963751	0.969391	0.961633	0.962742	0.977943
18	$Q_{G,18}$	0.015819	0.012754	0.009240	0.019536	0.026181	0.008460
19	$Q_{G,19}$	0.253150	0.258450	0.265945	0.262055	0.257586	0.257935
24	$Q_{G,24}$	-0.257769	-0.257458	-0.256812	-0.256756	-0.257845	-0.257366
25	$Q_{G,25}$	-0.339550	-0.338823	-0.336662	-0.337307	-0.340399	-0.338072
26	$Q_{G,26}$	1.741262	1.741467	1.742809	1.739498	1.744206	1.740741
27	$Q_{G,27}$	-1.434980	-1.434839	-1.433847	-1.435158	-1.434287	-1.434698
31	$Q_{G,31}$	-0.042763	-0.042111	-0.042940	-0.041866	-0.042875	-0.041594
32	$Q_{G,32}$	0.229519	0.230633	0.231957	0.232721	0.231330	0.229490
34	$Q_{G,34}$	-0.292623	-0.294968	-0.307017	-0.291220	-0.296953	-0.291710
36	$Q_{G,36}$	0.154919	0.150709	0.165193	0.162567	0.160056	0.158156
40	$Q_{G,40}$	0.003472	0.015538	-0.006359	-0.005604	0.011858	0.001931
42	$Q_{G,42}$	0.023858	0.020356	0.033797	0.004847	0.021431	0.024121
46	$Q_{G,46}$	0.285472	0.283955	0.287702	0.283992	0.284230	0.285348
49	$Q_{G,49}$	-0.155793	-0.155690	-0.155826	-0.156463	-0.155075	-0.155969
54	$Q_{G,54}$	1.513185	1.513561	1.515005	1.509829	1.512731	1.511451
55	$Q_{G,4}$	-0.017055	-0.022107	-0.013081	-0.005827	-0.014997	-0.011648
56	$Q_{G,4}$	-0.105972	-0.093991	-0.104156	-0.104744	-0.104453	-0.106351
59	$Q_{G,59}$	-0.384861	-0.385141	-0.384272	-0.383467	-0.384536	-0.384201
61	$Q_{G,61}$	1.202072	1.198757	1.199866	1.199881	1.197028	1.199354
62	$Q_{G,62}$	-0.139798	-0.140583	-0.143909	-0.138571	-0.143153	-0.138882
65	$Q_{G,65}$	-0.198976	-0.199071	-0.199652	-0.198558	-0.199590	-0.198786
66	$Q_{G,66}$	-2.834082	-2.833887	-2.834151	-2.835200	-2.832442	-2.834491
69	$P_{G,69,slack}$	4.909298	4.918238	4.885018	4.915800	4.919740	4.920000
	$Q_{G,69,slack}$	1.982924	1.982504	1.983084	1.982553	1.983903	1.982534
70	$Q_{G,70}$	-0.097430	-0.096093	-0.088154	-0.088696	-0.100379	-0.091612
72	$Q_{G,72}$	-0.101291	-0.102230	-0.104763	-0.102921	-0.107160	-0.101954
73	$Q_{G,73}$	0.077356	0.075098	0.067459	0.073776	0.067917	0.066419
74	$Q_{G,74}$	-0.134369	-0.133198	-0.123995	-0.140591	-0.121640	-0.132168
76	$Q_{G,76}$	-0.135769	-0.129893	-0.129005	-0.129038	-0.134689	-0.127904
77	$Q_{G,4}$	0.300387	0.301238	0.301226	0.301004	0.300542	0.300770
80	$Q_{G,80}$	2.244157	2.242265	2.238142	2.243779	2.243247	2.238449
85	$Q_{G,85}$	0.032898	0.032589	0.032785	0.032751	0.032871	0.032625
87	$Q_{G,87}$	0.110624	0.110530	0.110670	0.110645	0.110841	0.110608
89	$Q_{G,89}$	0.035344	0.038647	0.036407	0.036023	0.036871	0.037105
90	$Q_{G,90}$	0.587836	0.587800	0.587831	0.587921	0.587344	0.587735
91	$Q_{G,91}$	-0.129212	-0.129103	-0.129782	-0.129395	-0.129469	-0.129228
92	$Q_{G,92}$	-0.215743	-0.217884	-0.216381	-0.216135	-0.216572	-0.216939
99	$Q_{G,99}$	-0.175508	-0.175459	-0.175643	-0.175564	-0.175522	-0.175552
100	$Q_{G,100}$	0.958210	0.956892	0.958006	0.957811	0.957673	0.957248
103	$Q_{G,103}$	0.649023	0.647009	0.646192	0.648180	0.648223	0.648470
104	$Q_{G,104}$	-0.018858	-0.025822	-0.012894	-0.021099	-0.016144	-0.018738
105	$Q_{G,105}$	-0.071154	-0.074031	-0.063328	-0.063704	-0.070870	-0.072325
107	$Q_{G,107}$	0.001368	-0.000803	-0.002338	-0.009544	-0.004112	-0.000962
110	$Q_{G,110}$	0.023666	0.025203	0.013454	0.026606	0.017339	0.028134
111	$Q_{G,111}$	-0.016973	-0.016933	-0.016416	-0.017206	-0.017001	-0.016083
112	$Q_{G,112}$	0.227266	0.229179	0.233149	0.227120	0.233750	0.226546
113	$Q_{G,113}$	0.151335	0.144945	0.144509	0.146311	0.141069	0.146633
116	$Q_{G,116}$	-1.591606	-1.590561	-1.592593	-1.591750	-1.592117	-1.590389
Toplam Q_{gen} (pu)		4.112020	4.107496	4.102154	4.120250	4.098161	4.107908
Q_{loss} (pu)		-10.267980	-10.272504	-10.277846	-10.259750	-10.281838	-10.272092

Tablo 7. 30 çalışmaya ait istatistiki değerler (ncEPD)

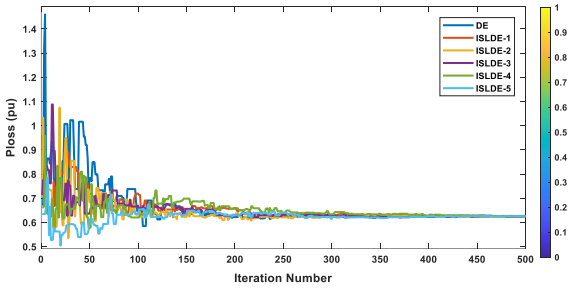
	DE	**ISLDE-1**	**ISLDE-2**	**ISLDE-3**	**ISLDE-4**	**ISLDE-5**
Eniyi	135411.228474 (Run: 12)	135411.362343 (Run: 17)	135415.637539 (Run: 12)	135414.267529 (Run: 10)	135413.386380 (Run: 10)	135411.175400 (Run: 17)
Ortalama	135430.557018	135524.451218	135491.816324	135531.629631	135501.751667	135489.683171
Enkötü	135487.556184 (Run: 23)	135840.561056 (Run: 23)	135759.4555 65 (Run: 13)	135972.070818 (Run: 24)	135813.009314 (Run: 2)	135727.341142 (Run: 11)
StdSapma	19.606033	118.094651	97.524139	132.384474	104.725298	94.427856
Toplam süre (s)	44797.5	46073.7	45614.7	44600.7	45062.1	44917.2
Ortalama süre (s)	1493.25	1535.79	1520.49	1486.69	1502.07	1497.24

Eniyi yakıt maliyetinin elde edildiği çalışmaya ait yakınsama eğrileri *TFC* için Şekil 6'da, P_{loss} için Şekil 7'de verilmiştir. 30 çalışmaya ait kutu grafikleri ise Şekil 8'de verilmiştir.



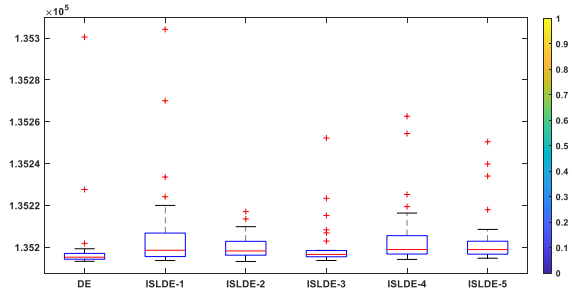
Şekil 6. Toplam yakıt maliyeti değerlerinin iterasyon sayısına göre değişimleri (cEPD)

Grafik incelendiğinde, ISLDE tabanlı algoritmaların başlangıç iterasyonlarından itibaren daha hızlı bir iyileşme sağladığı görülmektedir. Özellikle ISLDE-3 ve ISLDE-5 algoritmaları, hem daha düşük nihai maliyet değerlerine ulaşmakta hem de konverjans sürecinde daha kararlı bir performans sergilemektedir. Bu sonuçlar, sosyal öğrenme yapısının klasik DE algoritmasına entegrasyonunun, arama sürecini daha etkili hale getirdiğini göstermektedir.



Şekil 7. İletim hattı kayıplarının iterasyon sayısına göre değişimleri (cEPD)

Şekil 7'de verilen iletim hatlarında meydana gelen toplam aktif güç kaybı grafikleri incelendiğinde ise ilk 100 iterasyonda özellikle klasik DE algoritmasında yüksek dalgalanmalar mevcuttur, ISLDE algoritmaları ise daha kontrollü ve düşük dalgalı bir seyir izlemiştir.



Şekil 8. 30 çalışma için kutu grafikleri (cEPD)

Şekil 8'de verilen 30 çalışma için kutu grafikleri incelendiğinde ise bütün algoritmalarda sapan değerler mevcuttur. Enaz sapan değer 2 değerle ISLDE-2'de iken, en fazla sapan değer 6 tane ile ISLDE-3'dedir. ISLDE-1 yapısının diğer artırımlı öğrenme yapılarına göre daha zayıf olduğu bu grafikte de görülmektedir.

Verilen bütün tablo ve grafiklere genel olarak bakıldığında, konveks yapıda olan fonksiyonlar için artırımlı sosyal öğrenme kavramının kullanılmasının, klasik algoritma üzerinde kararlılık, arama aralığı ve süre bakımından olumlu etkiler gösterdiği söylenebilir.

4.2 Durum-2: Konveks olmayan ekonomik güç dağıtım problemi (ncEPD)

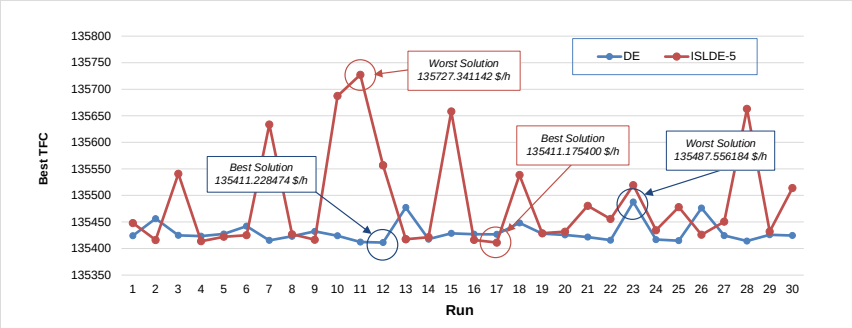
İkinci olarak, örnek güç sisteminin, Denklem (18)'de verilen konveks olmayan yakıt maliyeti fonksiyonu ile çözümü yapılmıştır. Örnek problem klasik algoritma ve geliştirilen diğer beş algoritma ile 30'ar kez çözülmüştür. Bu 30 çalışmadan eniyi yakıt maliyetinin elde edildiği çözüme ait aktif güç üretim değerleri Tablo 5'de, reaktif güç üretim değerleri Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 5 incelendiğinde 30 çalışma için eniyi yakıt maliyeti değerlerini, farklı aktif güç üretimi ve farklı iletim hattı kayıpları ile üç algoritma (DE, ISLDE-1 ve ISLDE-5) yakalamıştır. Süre bakımından en hızlı algoritma 1417.238985 s ile ISLDE-3 algoritması olmuştur.

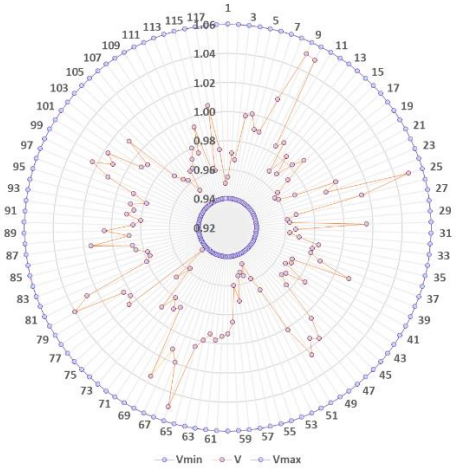
Konveks olmayan maliyet fonksiyonu ile çözümü yapılan sistemde, algoritmaların birbirlerine olan üstünlükleri ve kararlılıklarının değerlendirilebilmesi için, 30 çalışmanın tamamında elde edilen istatistiki değerler Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7 incelendiğinde üç algoritma (DE, ISLDE-1 ve ISLDE-5), 30 çalışma için eniyi çözüm bakımından benzer yakıt maliyeti değerlerini yakalamış, diğer algoritmalar bu maliyet değerinin bir miktar uzağında kalmışlardır. Eniyi yakıt maliyeti değeri ISLDE-5 algoritmasıyla 135411.175400 $/h olarak 17. çalışmada elde edilmiştir. 30 çalışmada elde edilen standart sapma değerlerine göre konveks olmayan fonksiyonlar için en kararlı algoritmanın klasik algoritma olduğu görülmüştür. En kararsız yapı ise ISLDE-3 olmuştur. Diğer bütün yapılar klasik DE'ye göre daha kararlı hale gelmesine rağmen ISLDE-1'de kararlılığın klasik algoritmaya göre iyileştirilemediği görülmüştür. Klasik algoritma ile 30 çalışmada elde edilen eniyi yakıt maliyeti değerleri ile artırımlı sosyal öğrenme yapılarından eniyi yakıt maliyetini elde eden ISLDE-5 algoritmasının 30 çalışmada elde ettiği değerler Şekil 9'da verilmiştir.

Bütün sonuçlar arasında eniyi yakıt maliyeti değerinin bulunduğu durum için (ISLDE-5, Run:17) sistemdeki bara gerilim değerlerinin grafiği ise Şekil 10'da verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere bütün bara gerilimleri verilen alt ve üst gerilim değerleri arasında yer almaktadır. Örnek istemde yer alan 54 adet üretim birimi bulunan baraların tamamı gerilim kontrollü baralar olduğundan, bara gerilim değerleri yük akışı süresince değişmemiştir.

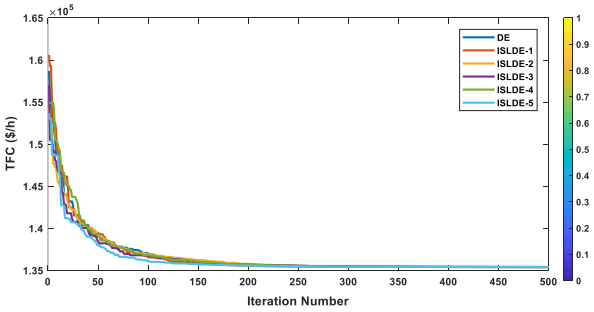


Şekil 9. 30 çalışmada elde edilen TFC değerleri (ncEPD)



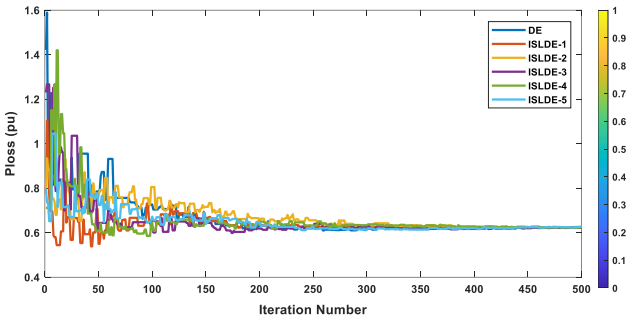
Şekil 10. ISLDE-5, Run:17 için bara gerilim değerleri (ncEPD)

ncEPD probleminin 30 kez çözümünde eniyi yakıt maliyetinin elde edildiği çalışmaya ait yakınsama eğrileri *TFC* için Şekil 11'de, P_{loss} için Şekil 12'de verilmiştir. 30 çalışmaya ait kutu grafikleri ise Şekil 13'de verilmiştir.

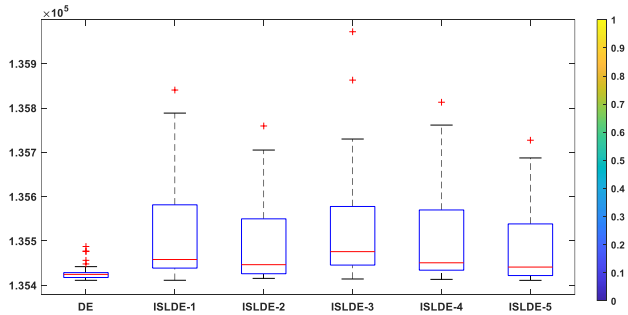


Şekil 11. Toplam yakıt maliyeti değerlerinin iterasyon sayısına göre değişimleri (ncEPD)

TFC için yakınsama eğrilerine bakıldığında ISLDE-5 yapısının diğer algoritmalara göre daha hızlı yakınsadığı görülmektedir. En yavaş yakınsama ISLDE-2'de olmuştur. 30 çalışma için kutu grafikleri incelendiğinde ise bütün algoritmalarda sapan değerler mevcuttur. Ençok sapan değer 4 değerle DE algoritması olmasına rağmen arama aralığı en küçük olan algoritma yine DE algoritmasıdır. Diğer algoritmaların konveks olmayan fonksiyonlar için kararlılıkları, klasik algoritmaya göre daha zayıftır.



Şekil 12. İletim hattı kayıplarının iterasyon sayısına göre değişimleri (ncEPD)



Şekil 13. 30 çalışma için kutu grafikleri (ncEPD)

Konveks olmayan maliyet fonksiyonları için verilen bütün tablo ve grafiklere genel olarak bakıldığında, artırımlı sosyal öğrenme kavramının kullanılmasının, klasik algoritma üzerinde işlem hızı ya da en iyi sonucu bulma konusunda olumlu etkileri görünmesine rağmen kararlılık ve arama aralığı bakımından olumsuz etkiler gösterebileceği söylenebilir. Daha uygun artırımlı öğrenme yapılarının geliştirilmesi, algoritma parametrelerinin probleme özgü olarak optimize edilmesi ile daha olumlu etkilerin elde edilebileceği görülmektedir.

5 İstatistiksel analizler

Bu çalışmada, önerilen artırımlı sosyal öğrenme tabanlı diferansiyel gelişim algoritmalarının (ISLDE-1, ISLDE-2, ISLDE-3, ISLDE-4 ve ISLDE-5) performanslarının klasik diferansiyel gelişim algoritması (DE) ile karşılaştırılması amacıyla her algoritma için toplam 30 tekrar yapılmıştır. Elde edilen toplam yakıt maliyeti değerleri üzerinden istatistiksel anlamlılık testleri bu bölümde gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sonuçlarının normal dağılım göstermemesi nedeniyle non-parametrik testler tercih edilmiştir. İkili karşılaştırmalar için Wilcoxon işaretli sıra testi (*signrank*) ve Mann-Whitney U testi (*ranksum*) uygulanmıştır [43-46]. Analizler ayrı ayrı hem konveks hem de konveks olmayan yakıt maliyeti fonksiyonları için gerçekleştirilmiştir. Konveks ve konveks olmayan fonksiyonlar için elde edilen sonuçlar Tablo 8'de verilmiştir.

Konveks olmayan fonksiyonlarla yapılan çalışmalarda da benzer şekilde her algoritma için 30 tekrar yapılmış ve "ranksum` ile `signrank` testleri uygulanmıştır. Tablo Y'de özetlenen test sonuçları, klasik DE algoritması ile tüm ISLDE algoritmaları arasında anlamlı farklar olduğunu ortaya koymuştur ($p<0.05$). ISLDE yapılarının kendi aralarındaki farkların ise çoğunlukla anlamsız olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca altı farklı algoritmanın performansları arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını değerlendirmek amacıyla, elde edilen toplam yakıt maliyeti değerlerine Kruskal-Wallis testi de uygulanmıştır. Test sonucunda algoritmalar arasında %95 güven aralığında anlamlı farklılıklar gözlenmiştir ($p<0.05$).

Yapılan istatistiksel analizler, önerilen ISLDE yapıların hem konveks hem de konveks olmayan EPD problemleri için klasik algoritmaya göre daha düşük toplam yakıt maliyeti sonuçları ürettiğini ve bu farkların istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir.

6 Sonuçlar

Çalışmada, DE algoritmasına artırımlı sosyal öğrenme yapısı entegre edilerek geliştirilen ISLDE algoritmalarıyla, konveks ve konveks olmayan EPD probleminin çözümü başarıyla yapılmıştır. İki farklı durum için ele alınan EPD probleminin çözümü için, örnek sistem olarak yüksek boyutlu modifiye edilmiş IEEE 118 baralı test sistemi seçilmiştir. Örnek sistemin çözümleri yapılırken iletim hattı kayıpları da dikkate alınmış ve bu kayıplar Newton-Raphson metoduyla AC güç akışı yapılarak hesaplanmıştır.

Çalışmada iki farklı durum için örnek sistem çözülmüştür. İlk durumda, 30 çalışma için eniyi yakıt maliyeti değeri *135193.225528 $/h* olarak ISLDE-3 algoritması ile hesaplanırken, süre bakımından en hızlı algoritma *1433.288900 s* ile ISLDE-5 algoritması olmuştur. İkinci durumda ise 30 çalışma için eniyi yakıt maliyeti değeri ISLDE-5 algoritmasıyla *135411.175400 $/h* olarak *17.* çalışmada elde edilmiştir. Çözüm süresi bakımından ise en hızlı algoritma *1417.238985 s* ile ISLDE-3 algoritması olmuştur. Bu sonuçlara bakıldığında klasik DE algoritmasına artırımlı sosyal öğrenme yapısının entegre edilmesi ile hem eniyi sonuca ulaşma hem de çözüm süresi bakımından algoritmada iyileştirme sağlandığı görülmüştür. Bunun yanında farklı sosyal öğrenme yapılarının da algoritma geliştirme de kullanılabileceği önerilmiştir.

Çalışmanın önemli amaçlarından biri karmaşık, doğrusal olmayan ve çok sayıda kısıtı bir arada bulunduran optimizasyon problemlerinden olan, güç mühendisliğinde büyük bir öneme sahip ve yapılan literatür çalışmalarında geniş bir yer tutan EPD probleminin ISLDE algoritmaları ile de çözülebilirliğini göstermektir. Bir diğer amaç ise literatürde çok az sayıda olan AC yük akışı ile çözümü yapılabilecek yüksek boyutlu bir örnek sistemin literatüre kazandırılmasıdır.

Tablo 8. Algoritmalar arası istatistiksel test sonuçları

	cEPD		***ncEPD***	
	signrank	***ranksum***	***signrank***	***ranksum***
DE - ISLDE-1	0.013974564	0.001679756	0.000114992	0.000035923
DE - ISLDE-2	0.004991554	0.000253058	0.000019729	0.000587373
DE - ISLDE-3	0.158855499	0.013271805	0.000012381	0.000008883
DE - ISLDE-4	0.005319684	0.000110577	0.000261343	0.000283887
DE - ISLDE-5	0.004389618	0.000038307	0.008216736	0.009883401
ISLDE-1 - ISLDE-2	0.440521591	0.888302842	0.280214408	0.251880825
ISLDE-1 - ISLDE-3	0.205888223	0.195790758	0.861212520	0.795845542
ISLDE-1 - ISLDE-4	0.599935928	0.599689485	0.404834722	0.395267011
ISLDE-1 - ISLDE-5	0.975387164	0.539510317	0.360038829	0.153667235
ISLDE-2 - ISLDE-3	0.205888223	0.063532651	0.253644098	0.125970193
ISLDE-2 - ISLDE-4	0.628843002	0.630876292	0.452806505	0.739398819
ISLDE-2 - ISLDE-5	0.958990172	0.662734758	0.877402728	0.630876292
ISLDE-3 - ISLDE-4	0.135907785	0.027086318	0.530440091	0.233988916
ISLDE-3 - ISLDE-5	0.115608188	0.017649028	0.152860694	0.074827008
ISLDE-4 - ISLDE-5	0.813016851	1.000000000	0.718887562	0.411910837

Teşekkür

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Akıllı Sistemler Tasarımı Uygulama ve Araştırma Merkezi (ASTAM)'a bu çalışma için gerekli bazı temel araştırma olanaklarını sağladığı için teşekkür ederim.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %15

Kaynaklar

[1] S. Özyön, C. Yaşar, H. Temurtaş, A novel hybrid algorithm for nonconvex economic power dispatch problems. IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE), 11(6), 92-101, 2016. https://doi.org/10.9790/1676.11060392101

[2] C. Yaşar, S. Özyön, A new hybrid approach for nonconvex economic dispatch problem with valve point effect. Energy, 36(10), 5838-45, 2011. https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.08.041

[3] C. Dai, Z. Hu, Q. Su, An adaptive hybrid backtracking search optimization algorithm for dynamic economic dispatch with valve-point effects. Energy, 239(122461), 1-18, 2022. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122461

[4] A. Bhattacharya, P. K. Chattopadhyay, Hybrid differential evolution with biogeography-based optimization for solution of economic load dispatch. IEEE Trans Power Syst, 25(4), 1955-64, 2010. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2043270

[5] T. Liu, G. Xiong, A.W. Mohamed, P. N. Suganthan, Opposition-mutual learning differential evolution with hybrid mutation strategy for large-scale economic load dispatch problems with valve-point effects and multi-fuel options. Inf Sci, 609, 1721-45, 2022. https://doi.org/10.1016/j.ins.2022.07.148

[6] M. A. Al-Betar, M.A. Awadallah, S.N. Makhadmed, I.A. Doush, R.A. Zitar, S. Alshathri, M. Abd Elaziz, A hybrid Harris Hawks optimizer for economic load dispatch problems. Alexandria Eng J, 64, 365-89, 2023. https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.09.010

[7] M. H. Hassan, S. Kamel, F. Jurado, U. Desideri, Global optimization of economic load dispatch in large scale power systems using an enhanced social network search algorithm. Int J Electr Power Energy Syst, 156(109719), 1-30, 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109719

[8] M. H. Hassan, S. Kamel, A. Eid, L. Nasrat, F, Jurado, M.F. Elnaggar, A developed eagle-strategy supply-demand optimizer for solving economic load dispatch problems. Ain Shams Eng J, 14(102083), 1-25, 2023. https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.102083

[9] Z. Hu, C. Dai, Q. Su, Adaptive backtracking search optimization algorithm with a dual-learning strategy for dynamic economic dispatch with valve-point effects. Energy, 248(123558), 1-16, 2022. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123558

[10] Y. Sharifian, H. Abdi, Solving multi-area economic dispatch problem using hybrid exchange market algorithm with grasshopper optimization algorithm. Energy, 267(126550), 1-12, 2023. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126550

[11] M. N. Iqbal, A. R. Bhatti, A. D. Butt, Y. A. Sheikh, K. N. Paracha, R. H. Ashique, Solution of economic dispatch problem using hybrid multi-verse optimizer. Electr Power Syst Res, 208(107912), 1-8, 2022. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.107912

[12] H. Sharifzadeh, Two efficient logarithmic formulations to solve nonconvex economic dispatch. Electr Power Syst Res, 229(110123), 1-10, 2024. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110123

[13] W. Luo, X. Yu, Reinforcement learning-based modified cuckoo search algorithm for economic dispatch problems. Knowledge-Based Syst, 257(109844), 1-17, 2022, https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.109844

[14] C. Chen, L. Qu, M. L. Tseng, L. Li, C. C. Chen, M. K. Lim, Reducing fuel cost and enhancing the resource utilization rate in energy economic load dispatch problem. J Cleaner Prod, 364(132709), 1-13, 2022. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132709

[15] X. Y. Zhang, W. K. Hao, J. S. Wang, J. H. Zhu, X. R. Zhao, Y. Zheng, Manta ray foraging optimization algorithm with mathematical spiral foraging strategies for solving economic load dispatching problems in power systems. Alexandria Eng J, 70, 613-40, 2023. https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.03.017

[16] M. H. Hassan, S. Kamel, F. Jurado, M. Ebeed, M. F. Elnaggar, Economic load dispatch solution of large-scale power systems using an enhanced beluga whale optimizer. Alexandria Eng J, 72, 573-91, 2023. https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.04.002

[17] L. Fu, H. Ouyang, C. Zhang, S. Li, A. W. Mohamed, A constrained cooperative adaptive multi-population differential evolutionary algorithm for economic load dispatch problems. Appl Soft Comput, 121(108719), 1-18, 2022. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108719

[18] X. Yu, Q. Zhao, T. Wang, Y. Li, An antigravity-based fuzzy Gravitational Search Algorithm for economic dispatch problems. Appl Soft Comput, 145(110630), 1-23, 2023. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110630

[19] T. Visutarrom, T. C. Chiang, Economic dispatch using metaheuristics: Algorithms, problems, and solutions. Appl Soft Comput, 150(110891), 1-43, 2024. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110891

[20] J. S. Pan, J. Shan, S. C. Chu, S. J. Jiang, S. G. Zheng, L. Liao, A multigroup marine predator algorithm and its application for the power system economic load dispatch. Energy Sci Eng, 10(6), 1840-54, 2022. https://doi.org/10.1002/ese3.957

[21] R. P. Parouha, P. Verma, An innovative hybrid algorithm to solve nonconvex economic load dispatch problem with or without valve point effects. Int Trans

Electr Energy Syst, 31(1), 1-67, 2021. https://doi.org/10.1002/2050-7038.12682

[22] R. Ramalingam, D. Karunanidy, S. S. Alshamrani, M. Rashid, S. Mathumohan, A. Dumka, Oppositional pigeon-inspired optimizer for solving the non-convex economic load dispatch problem in power systems. Mathematics, 10(18)(3315), 1-24, 2022. https://doi.org/10.3390/math10183315

[23] Q. Liu, G. Xiong, X. Fu, A. W. Mohamed, J. Zhang, M. A. Al-Betar, S. Xu, Hybridizing gaining–sharing knowledge and differential evolution for large-scale power system economic dispatch problems. J Comput Des Eng, 10(2), 615-31, 2023. https://doi.org/10.1093/jcde/qwad008

[24] M. Braik, M. A. Awadallah, M. A. Al-Betar, A. I. Hammouri, A hybrid capuchin search algorithm with gradient search algorithm for economic dispatch problem. Soft Comput, 27(22), 16809-41, 2023. https://doi.org/10.1007/s00500-023-09019-6

[25] T. Singh, Chaotic slime mould algorithm for economic load dispatch problems. Appl Intell, 52(13), 15325-44, 2023. https://doi.org/10.1007/s10489-022-03179-y

[26] M. S. Braik, M. A. Awadallah, M. A. Al-Betar, A. I. Hammouri, R. A. Zitar, A non-convex economic load dispatch problem using chameleon swarm algorithm with roulette wheel and Levy flight methods. Appl Intell, 53, 17508-47, 2023. https://doi.org/10.1007/s10489-022-04363-w

[27] V. Garg, K. Deep, N. P. Padhee, Constrained laplacian biogeography-based optimization for economic load dispatch problems. Process Integr Optim Sustainability, 6(2), 483-96, 2022. https://doi.org/10.1007/s41660-022-00227-5

[28] M. A. Montes de Oca, T. Stützle, K. Van den Enden, M. Dorigo, Incremental social learning in particle swarms. IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part B Cybern, 41(2), 368-84, 2011. https://doi.org/10.1109/TSMCB.2010.2055848

[29] T. Liao, M. A. Montes de Oca, D. Aydın, T. Stützle, M. Dorigo, An incremental ant colony algorithm with local search for continuous optimization problems. In: Proceeding of genetic and evolutionary computation conference (GECCO 2011), 125-32. https://doi.org/10.1145/2001576.2001594

[30] D. Aydın, S. Özyön, Solution to non-convex economic dispatch problem with valve point effects by incremental artificial bee colony with local search. Appl. Soft Comput, 13(5), 2456-66, 2013. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2012.12.002

[31] S. Özyön, D. Aydın, Incremental artificial bee colony with local search to economic dispatch problem with ramp rate limits and prohibited operating zones. Energy Convers. Manage, 65, 397-407, 2013. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.07.005

[32] D. Aydın, S. Özyön, C. Yaşar, L. Tianjun, Artificial bee colony algorithm with dynamic population size to combined economic and emission dispatch problem. Int. J. Electr. Power Energy Syst, 54, 144-153, 2014. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.06.020

[33] S. Özyön, C. Yaşar, H. Temurtaş, Incremental gravitational search algorithm for high-dimensional benchmark functions. Neural Comput. Appl, 31(8), 3779-3803, 2019. https://doi.org/10.1007/s00521-017-3334-8

[34] C. Yaşar, S. Özyön, A modified incremental gravitational search algorithm for short-term hydrothermal scheduling with variable head. Eng. Appl. Artif. Intell, 95(103845), 1-17, 2020. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.103845

[35] S. Özyön, Differential evolution algorithm with incremental social learning. Bilecik Şeyh Edebali University J. Sci. Technol, 7, 133-63, 2020. https://doi.org/10.35193/bseufbd.666626

[36] D. Karaboğa, Artificial Intelligence Optimization Algorithms (Turkish), Atlas Publishing Distribution, First Edition, Turkey, 2004.

[37] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, G. B. Sheble, Power Generation Operation and Control, IEEE & Wiley, Third Edition, USA, 2013.

[38] D. P. Kothari, J. S. Dhillon. Power System Optimization, PHI, New Delhi, 2007.

[39] P. Rossoni, W. M. Rosa, E. A. Belati, Linearized AC load flow applied to analysis in electric power systems, IEEE Lat. Am. Trans, 14(9), 4048-53, 2016. https://doi.org/10.1109/TLA.2016.7785932

[40] C. Yaşar, S. Özyön, H. Temurtaş, A new program design developed for AC load flow analysis problems. Kırıkkale University Faculty of Engineering Int. J. Eng. Res. Dev, 9(3), 207-22, 2017. https://doi.org/10.29137/umagd.372979

[41] J. Lin, F. H. Magnago, Power System Economic Dispatch, in Electricity Markets: Theories and Applications, Wiley-IEEE Press, 119-46, 2017. https://doi.org/10.1002/9781119179382.ch5

[42] Al-roomi Power. https://www.al-roomi.org/power-flow/118-bus-system . Erişim tarihi 02 Ocak 2025.

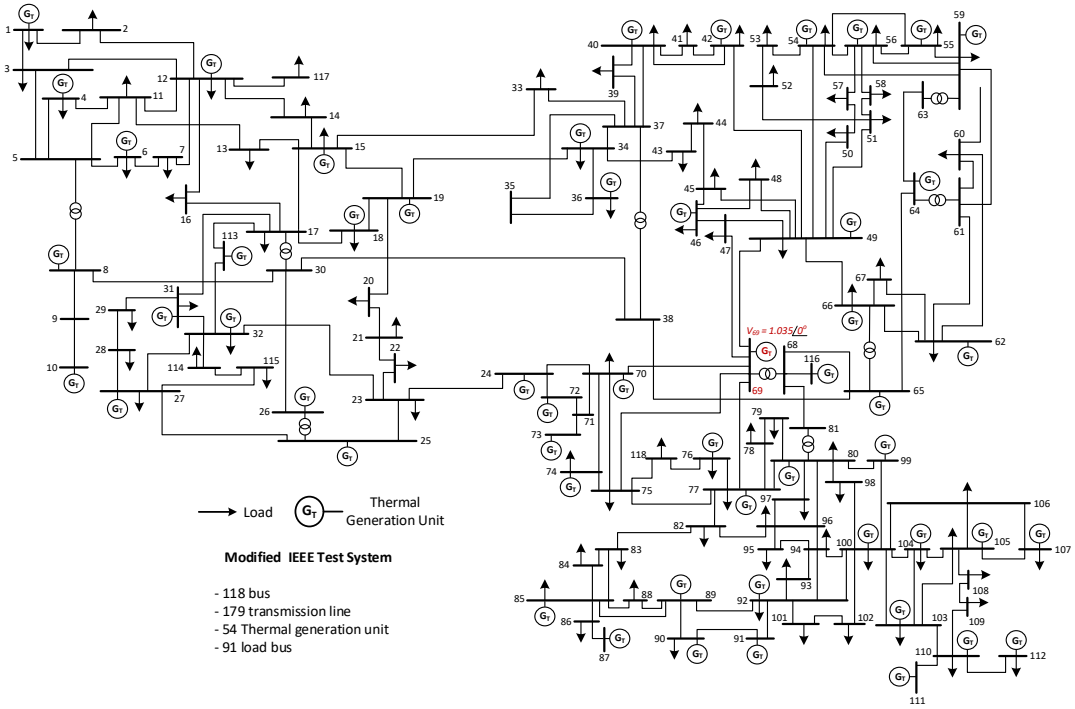
[43] S. García, D. Molina, M. Lozano, F. Herrera, A study on the use of non-parametric tests for analyzing the evolutionary algorithms' behaviour: a case study on the CEC'2005 special session on real parameter optimization. Journal of Heuristics, 15, 617-44, 2019.

[44] H. Zhang, Z. Wang, D. Liu, A comprehensive review of stability analysis of continuous-time recurrent neural networks. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 25(7), 1229-62, 2014.

[45] Matlab Help Center. https://www.mathworks.com/help/stats/ranksum.html. Erişim tarihi 02 Ocak 2025.

[46] Matlab Help Center. https://www.mathworks.com/help/stats/signrank.html. Erişim tarihi 02 Ocak 2025.

Ekler (Değiştirilmiş IEEE 118 bara test sistemi verileri)



Şekil A1. Örnek sisteme ait tek hat diyagramı

Tablo A1. Nominal π eşdeğer devresine ait iletim hattı değerleri

Line no	*From bus*	*To bus*	*R (pu)*	*X (pu)*	*B (pu)*
1	1	2	0.03030	0.09990	0.02540
2	1	3	0.01290	0.04240	0.01082
3	4	5	0.00176	0.00798	0.00210
4	3	5	0.02410	0.10800	0.02840
5	5	6	0.01190	0.05400	0.01426
6	6	7	0.00459	0.02080	0.00550
7	8	9	0.00244	0.03050	1.16200
8	8	5	-	0.02670	-
9	9	10	0.00258	0.03220	1.23000
10	4	11	0.02090	0.06880	0.01748
11	5	11	0.02030	0.06820	0.01738
12	11	12	0.00595	0.01960	0.00502
13	2	12	0.01870	0.06160	0.01572
14	3	12	0.04840	0.16000	0.04060
15	7	12	0.00862	0.03400	0.00874
16	11	13	0.02225	0.07310	0.01876
17	12	14	0.02150	0.07070	0.01816
18	13	15	0.07440	0.24440	0.06268
19	14	15	0.05950	0.19500	0.05020
20	12	16	0.02120	0.08340	0.02140
21	15	17	0.01320	0.04370	0.04440
22	16	17	0.04540	0.18010	0.04660
23	17	18	0.01230	0.05050	0.01298
24	18	19	0.01119	0.04930	0.01142
25	19	20	0.02520	0.11700	0.02980
26	15	19	0.01200	0.03940	0.01010
27	20	21	0.01830	0.08490	0.02160
28	21	22	0.02090	0.09700	0.02460

29	22	23	0.03420	0.15900	0.04040
30	23	24	0.01350	0.04920	0.04980
31	23	25	0.01560	0.08000	0.08640
32	26	25	-	0.03820	-
33	25	27	0.03180	0.16300	0.17640
34	27	28	0.01913	0.08550	0.02160
35	28	29	0.02370	0.09430	0.02380
36	30	17	-	0.03880	-
37	8	30	0.00431	0.05040	0.51400
38	26	30	0.00799	0.08600	0.90800
39	17	31	0.04740	0.15630	0.03990
40	29	31	0.01080	0.03310	0.00830
41	23	32	0.03170	0.11530	0.11730
42	31	32	0.02980	0.09850	0.02510
43	27	32	0.02290	0.07550	0.01926
44	15	33	0.03800	0.12440	0.03194
45	19	34	0.07520	0.24700	0.06320
46	35	36	0.00224	0.01020	0.00268
47	35	37	0.01100	0.04970	0.01318
48	33	37	0.04150	0.14200	0.03660
49	34	36	0.00871	0.02680	0.00568
50	34	37	0.00256	0.00940	0.00984
51	38	37	-	0.03750	-
52	37	39	0.03210	0.10600	0.02700
53	37	40	0.05930	0.16800	0.04200
54	30	38	0.00464	0.05400	0.42200
55	39	40	0.01840	0.06050	0.01552
56	40	41	0.01450	0.04870	0.01222
57	40	42	0.05550	0.18300	0.04660
58	41	42	0.04100	0.13500	0.03440
59	43	44	0.06080	0.24540	0.06068
60	34	43	0.04130	0.16810	0.04226
61	44	45	0.02240	0.09010	0.02240
62	45	46	0.04000	0.13560	0.03320
63	46	47	0.03800	0.12700	0.03160
64	46	48	0.06010	0.18900	0.04720
65	47	49	0.01910	0.06250	0.01604
66	42	49	0.03575	0.16150	0.17200
67	45	49	0.06840	0.18600	0.04440
68	48	49	0.01790	0.05050	0.01258
69	49	50	0.02670	0.07520	0.01874
70	49	51	0.04860	0.13700	0.03420
71	51	52	0.02030	0.05880	0.01396
72	52	53	0.04050	0.16350	0.04058
73	53	54	0.02630	0.12200	0.03100
74	49	54	0.03993	0.14507	0.14680
75	54	55	0.01690	0.07070	0.02020
76	54	56	0.00275	0.00955	0.00732
77	55	56	0.00488	0.01510	0.00374
78	56	57	0.03430	0.09660	0.02420
79	50	57	0.04740	0.13400	0.03320
80	56	58	0.03430	0.09660	0.02420
81	51	58	0.02550	0.07190	0.01788
82	54	59	0.05030	0.22930	0.05980
83	56	59	0.04070	0.12243	0.11050
84	55	59	0.04739	0.21580	0.05646
85	59	60	0.03170	0.14500	0.03760

86	59	61	0.03280	0.15000	0.03880
87	60	61	0.00264	0.01350	0.01456
88	60	62	0.01230	0.05610	0.01468
89	61	62	0.00824	0.03760	0.00980
90	63	59	-	0.03860	-
91	63	64	0.00172	0.02000	0.21600
92	64	61	-	0.02680	-
93	38	65	0.00901	0.09860	1.04600
94	64	65	0.00269	0.03020	0.38000
95	49	66	0.00900	0.04595	0.04960
96	62	66	0.04820	0.21800	0.05780
97	62	67	0.02580	0.11700	0.03100
98	65	66	-	0.03700	-
99	66	67	0.02240	0.10150	0.02682
100	65	68	0.00138	0.01600	0.63800
101	47	69	0.08440	0.27780	0.07092
102	49	69	0.09850	0.32400	0.08280
103	68	69	-	0.03700	-
104	69	70	0.03000	0.12700	0.12200
105	24	70	0.00221	0.41150	0.10198
106	70	71	0.00882	0.03550	0.00878
107	24	72	0.04880	0.19600	0.04880
108	71	72	0.04460	0.18000	0.04444
109	71	73	0.00866	0.04540	0.01178
110	70	74	0.04010	0.13230	0.03368
111	70	75	0.04280	0.14100	0.03600
112	69	75	0.04050	0.12200	0.12400
113	74	75	0.01230	0.04060	0.01034
114	76	77	0.04440	0.14800	0.03680
115	69	77	0.03090	0.10100	0.10380
116	75	77	0.06010	0.19990	0.04978
117	77	78	0.00376	0.01240	0.01264
118	78	79	0.00546	0.02440	0.00648
119	77	80	0.01088	0.03321	0.07000
120	79	80	0.01560	0.07040	0.01870
121	68	81	0.00175	0.02020	0.80800
122	81	80	-	0.03700	-
123	77	82	0.02980	0.08530	0.08174
124	82	83	0.01120	0.03665	0.03796
125	83	84	0.06250	0.13200	0.02580
126	83	85	0.04300	0.14800	0.03480
127	84	85	0.03020	0.06410	0.01234
128	85	86	0.03500	0.12300	0.02760
129	86	87	0.02828	0.20740	0.04450
130	85	88	0.02000	0.10200	0.02760
131	85	89	0.02390	0.17300	0.04700
132	88	89	0.01390	0.07120	0.01934
133	89	90	0.01638	0.06517	0.15880
134	90	91	0.02540	0.08360	0.02140
135	89	92	0.00799	0.03829	0.09620
136	91	92	0.03870	0.12720	0.03268
137	92	93	0.02580	0.08480	0.02180
138	92	94	0.04810	0.15800	0.04060
139	93	94	0.02230	0.07320	0.01876
140	94	95	0.01320	0.04340	0.01110
141	80	96	0.03560	0.18200	0.04940
142	82	96	0.01620	0.05300	0.05440

143	94	96	0.02690	0.08690	0.02300
144	80	97	0.01830	0.09340	0.02540
145	80	98	0.02380	0.10800	0.02860
146	80	99	0.04540	0.20600	0.05460
147	92	100	0.06480	0.29500	0.04720
148	94	100	0.01780	0.05800	0.06040
149	95	96	0.01710	0.05470	0.01474
150	96	97	0.01730	0.08850	0.02400
151	98	100	0.03970	0.17900	0.04760
152	99	100	0.01800	0.08130	0.02160
153	100	101	0.02770	0.12620	0.03280
154	92	102	0.01230	0.05590	0.01464
155	101	102	0.02460	0.11200	0.02940
156	100	103	0.01600	0.05250	0.05360
157	100	104	0.04510	0.20400	0.05410
158	103	104	0.04660	0.15840	0.04070
159	103	105	0.05350	0.16250	0.04080
160	100	106	0.06050	0.22900	0.06200
161	104	105	0.00994	0.03780	0.00986
162	105	106	0.01400	0.05470	0.01434
163	105	107	0.05300	0.18300	0.04720
164	105	108	0.02610	0.07030	0.01844
165	106	107	0.05300	0.18300	0.04720
166	108	109	0.01050	0.02880	0.00760
167	103	110	0.03906	0.18130	0.04610
168	109	110	0.02780	0.07620	0.02020
169	110	111	0.02200	0.07550	0.02000
170	110	112	0.02470	0.06400	0.06200
171	17	113	0.00913	0.03010	0.00768
172	32	113	0.06150	0.20300	0.05180
173	32	114	0.01350	0.06120	0.01628
174	27	115	0.01640	0.07410	0.01972
175	114	115	0.00230	0.01040	0.00276
176	68	116	0.00034	0.00405	0.16400
177	12	117	0.03290	0.14000	0.03580
178	75	118	0.01450	0.04810	0.01198
179	76	118	0.01640	0.05440	0.01356

Tablo A2. Aktif ve reaktif yük değerleri

Bus No	P_{load} ***(pu)***	Q_{load} ***(pu)***	***Bus No***	P_{load} ***(pu)***	Q_{load} ***(pu)***
1	0.5100	0.2700	**60**	0.7800	0.0300
2	0.2000	0.0900	**61**	-	-
3	0.3900	0.1000	**62**	0.7700	0.1400
4	0.3900	0.1200	**63**	-	-
5	-	-	**64**	-	-
6	0.5200	0.2200	**65**	-	-
7	0.1900	0.0200	**66**	0.3900	0.1800
8	0.2800	0.0000	**67**	0.2800	0.0700
9	-	-	**68**	-	-
10	-	-	**69**	-	-
11	0.7000	0.2300	**70**	0.6600	0.2000
12	0.4700	0.1000	**71**	-	-
13	0.3400	0.1600	**72**	0.1200	-
14	0.1400	0.0100	**73**	0.0600	-
15	0.9000	0.3000	**74**	0.6800	0.2700
16	0.2500	0.1000	**75**	0.4700	0.1100

17	0.1100	0.0300	**76**	0.6800	0.3600
18	0.6000	0.3400	**77**	0.6100	0.2800
19	0.4500	0.2500	**78**	0.7100	0.2600
20	0.1800	0.0300	**79**	0.3900	0.3200
21	0.1400	0.0800	**80**	1.3000	0.2600
22	0.1000	0.0500	**81**	-	-
23	0.0700	0.0300	**82**	0.5400	0.2700
24	0.1300	-	**83**	0.2000	0.1000
25	-	-	**84**	0.1100	0.0700
26	-	-	**85**	0.2400	0.1500
27	0.7100	0.1300	**86**	0.2100	0.1000
28	0.1700	0.0700	**87**	-	-
29	0.2400	0.0400	**88**	0.4800	0.1000
30	-	-	**89**	-	-
31	0.4300	0.2700	**90**	1.6300	0.4200
32	0.5900	0.2300	**91**	0.1000	-
33	0.2300	0.0900	**92**	0.6500	0.1000
34	0.5900	0.2600	**93**	0.1200	0.0700
35	0.3300	0.0900	**94**	0.3000	0.1600
36	0.3100	0.1700	**95**	0.4200	0.3100
37	-	-	**96**	0.3800	0.1500
38	-	-	**97**	0.1500	0.0900
39	0.2700	0.1100	**98**	0.3400	0.0800
40	0.6600	0.2300	**99**	0.4200	-
41	0.3700	0.1000	**100**	0.3700	0.1800
42	0.9600	0.2300	**101**	0.2200	0.1500
43	0.1800	0.0700	**102**	0.0500	0.0300
44	0.1600	0.0800	**103**	0.2300	0.1600
45	0.5300	0.2200	**104**	0.3800	0.2500
46	0.2800	0.1000	**105**	0.3100	0.2600
47	0.3400	-	**106**	0.4300	0.1600
48	0.2000	0.1100	**107**	0.5000	0.1200
49	0.8700	0.3000	**108**	0.0200	0.0100
50	0.1700	0.0400	**109**	0.0800	0.0300
51	0.1700	0.0800	**110**	0.3900	0.3000
52	0.1800	0.0500	**111**	-	-
53	0.2300	0.1100	**112**	0.6800	0.1300
54	1.1300	0.3200	**113**	0.0600	-
55	0.6300	0.2200	**114**	0.0800	0.0300
56	0.8400	0.1800	**115**	0.2200	0.0700
57	0.1200	0.0300	**116**	1.8400	-
58	0.1200	0.0300	**117**	0.2000	0.0800
59	2.7700	1.1300	**118**	0.3300	0.1500
Toplam yük		***P_{load}: 42.4200 pu***		***Q_{load}: 14.3800 pu***	

Tablo A3. AC yük akış analizi başlangıç verileri

Gen. Unit	***Bus No***	***P_i (pu)***	***Q_i (pu)***	***V (pu)***	***Gen. Unit***	***Bus No***	***P_i (pu)***	***Q_i (pu)***	***V (pu)***
1	1	0.500	0.075	0.955	**28**	65	2.000	1.000	1.005
2	4	0.500	1.500	0.998	**29**	66	2.000	1.000	1.050
3	6	0.500	0.250	0.990	**30**	69	-	-	1.035
4	8	0.500	1.500	1.015	**31**	70	0.500	0.150	0.984
5	10	2.000	1.000	1.050	**32**	72	0.500	0.500	0.980
6	12	1.000	0.600	0.990	**33**	73	0.500	0.500	0.991
7	15	0.500	0.150	0.970	**34**	74	0.500	0.045	0.958
8	18	0.500	0.250	0.973	**35**	76	0.500	0.120	0.943

9	19	0.500	0.120	0.962	**36**	77	0.500	0.350	1.006
10	24	0.500	1.500	0.992	**37**	80	2.000	1.400	1.040
11	25	1.000	0.700	1.050	**38**	85	0.500	0.120	0.985
12	26	2.000	5.000	1.015	**39**	87	0.500	5.000	1.015
13	27	0.500	1.500	0.968	**40**	89	2.000	1.500	1.005
14	31	0.500	1.500	0.967	**41**	90	0.500	1500	0.985
15	32	0.500	0.210	0.963	**42**	91	0.500	0.500	0.980
16	34	0.500	0.120	0.984	**43**	92	0.500	0.045	0.990
17	36	0.500	0.120	0.980	**44**	99	0.500	0.500	1.010
18	40	0.500	1.500	0.970	**45**	100	1.000	0.750	1.017
19	42	0.500	1.500	0.985	**46**	103	0.500	0.200	1.010
20	46	0.500	0.500	1.005	**47**	104	0.500	0.120	0.971
21	49	1.000	1.000	1.025	**48**	105	0.500	0.120	0.965
22	54	0.500	1.500	0.955	**49**	107	0.500	1.000	0.952
23	55	0.500	0.120	0.952	**50**	110	0.500	0.120	0.973
24	56	0.500	0.075	0.954	**51**	111	0.500	5.000	0.980
25	59	1.000	0.900	0.985	**52**	112	0.500	5.000	0.975
26	61	1.000	1.500	0.995	**53**	113	0.500	1.000	0.993
27	62	0.500	0.100	0.998	**54**	116	0.500	5.000	1.005

Tablo A4. Üretim birimlerine ait işletim limitleri

Gen. Unit	***Bus***	P_{min} ***(pu)***	P_{max} ***(pu)***	Q_{min} ***(pu)***	Q_{max} ***(pu)***	V_{min} ***(pu)***	V_{max} ***(pu)***
1	1	0.0000	1.0000	-0.0500	0.1500	0.9400	1.0600
2	4	0.0000	1.0000	-3.0000	3.0000	0.9400	1.0600
3	6	0.0000	1.0000	-0.1300	0.5000	0.9400	1.0600
4	8	0.0000	1.0000	-3.0000	3.0000	0.9400	1.0600
5	10	0.0000	5.5000	-1.4700	2.0000	0.9400	1.0600
6	12	0.0000	1.8500	-0.3500	1.2000	0.9400	1.0600
7	15	0.0000	1.0000	-0.1000	0.3000	0.9400	1.0600
8	18	0.0000	1.0000	-0.1600	0.5000	0.9400	1.0600
9	19	0.0000	1.0000	-0.0800	0.2400	0.9400	1.0600
10	24	0.0000	1.0000	-3.0000	3.0000	0.9400	1.0600
11	25	0.0000	3.2000	-0.4700	1.4000	0.9400	1.0600
12	26	0.0000	4.1400	-10.0000	10.0000	0.9400	1.0600
13	27	0.0000	1.0000	-3.0000	3.0000	0.9400	1.0600
14	31	0.0000	1.0700	-3.0000	3.0000	0.9400	1.0600
15	32	0.0000	1.0000	-0.1400	0.4200	0.9400	1.0600
16	34	0.0000	1.0000	-0.0800	0.2400	0.9400	1.0600
17	36	0.0000	1.0000	-0.0800	0.2400	0.9400	1.0600
18	40	0.0000	1.0000	-3.0000	3.0000	0.9400	1.0600
19	42	0.0000	1.0000	-3.0000	3.0000	0.9400	1.0600
20	46	0.0000	1.1900	-1.0000	1.0000	0.9400	1.0600
21	49	0.0000	3.0400	-0.8500	2.1000	0.9400	1.0600
22	54	0.0000	1.4800	-3.0000	3.0000	0.9400	1.0600
23	55	0.0000	1.0000	-0.0800	0.2300	0.9400	1.0600
24	56	0.0000	1.0000	-0.0800	0.1500	0.9400	1.0600
25	59	0.0000	2.5500	-0.6000	1.8000	0.9400	1.0600
26	61	0.0000	2.6000	-1.0000	3.0000	0.9400	1.0600
27	62	0.0000	1.0000	-0.2000	0.2000	0.9400	1.0600
28	65	0.0000	4.9100	-0.6700	2.0000	0.9400	1.0600
29	66	0.0000	4.9200	-0.6700	2.0000	0.9400	1.0600
30	69	0.0000	8.0520	-3.0000	3.0000	0.9400	1.0600
31	70	0.0000	1.0000	-0.1000	0.3200	0.9400	1.0600
32	72	0.0000	1.0000	-1.0000	1.0000	0.9400	1.0600
33	73	0.0000	1.0000	-1.0000	1.0000	0.9400	1.0600
34	74	0.0000	1.0000	-0.0600	0.0900	0.9400	1.0600
35	76	0.0000	1.0000	-0.0800	0.2300	0.9400	1.0600

36	77	0.0000	1.0000	-0.2000	0.7000	0.9400	1.0600
37	80	0.0000	5.7700	-1.6500	2.8000	0.9400	1.0600
38	85	0.0000	1.0000	-0.0800	0.2300	0.9400	1.0600
39	87	0.0000	1.0400	-1.0000	10.0000	0.9400	1.0600
40	89	0.0000	7.0700	-2.1000	3.0000	0.9400	1.0600
41	90	0.0000	1.0000	-3.0000	3.0000	0.9400	1.0600
42	91	0.0000	1.0000	-1.0000	1.0000	0.9400	1.0600
43	92	0.0000	1.0000	-0.0300	0.0900	0.9400	1.0600
44	99	0.0000	1.0000	-1.0000	1.0000	0.9400	1.0600
45	100	0.0000	3.5200	-0.5000	1.5500	0.9400	1.0600
46	103	0.0000	1.4000	-0.1500	0.4000	0.9400	1.0600
47	104	0.0000	1.0000	-0.0800	0.2300	0.9400	1.0600
48	105	0.0000	1.0000	-0.0800	0.2300	0.9400	1.0600
49	107	0.0000	1.0000	-2.0000	2.0000	0.9400	1.0600
50	110	0.0000	1.0000	-0.0800	0.2300	0.9400	1.0600
51	111	0.0000	1.3600	-1.0000	10.0000	0.9400	1.0600
52	112	0.0000	1.0000	-1.0000	10.0000	0.9400	1.0600
53	113	0.0000	1.0000	-1.0000	2.0000	0.9400	1.0600
54	116	0.0000	1.0000	-10.0000	10.0000	0.9400	1.0600

Tablo A5. Üretim birimlerine ait konvex ve konveks olmayan maliyet katsayıları

Gen. Unit	***Bus No.***	***a***	***b***	***c***	***e***	***f***
1	1	0	4000	100	0	0
2	4	0	4000	100	0	0
3	6	0	4000	100	0	0
4	8	0	4000	100	0	0
5	10	0	2000	222.222222	100	8.4
6	12	0	2000	1176.47059		
7	15	0	4000	100	0	0
8	18	0	4000	100	0	0
9	19	0	4000	100	0	0
10	24	0	4000	100	100	8.4
11	25	0	2000	454.545455	120	7.7
12	26	0	2000	318.471338	0	0
13	27	0	4000	100	0	0
14	31	0	2000	14285.7143	0	0
15	32	0	4000	100	0	0
16	34	0	4000	100	0	0
17	36	0	4000	100	0	0
18	40	0	4000	100	0	0
19	42	0	4000	100	0	0
20	46	0	2000	5263.15786	0	0
21	49	0	2000	490.196078	0	0
22	54	0	2000	2083.33333	0	0
23	55	0	4000	100	0	0
24	56	0	4000	100	0	0
25	59	0	2000	645.16129	0	0
26	61	0	2000	625	0	0
27	62	0	4000	100	0	0
28	65	0	2000	255.754476	150	6.3
29	66	0	2000	255.102041	0	0
30	69	0	2000	193.648335	0	0
31	70	0	4000	100	0	0
32	72	0	4000	100	0	0
33	73	0	4000	100	0	0
34	74	0	4000	100	0	0
35	76	0	4000	100	0	0
36	77	0	4000	100	105	8.1

37	80	0	2000	209.643606	0	0
38	85	0	4000	100	0	0
39	87	0	2000	25000	0	0
40	89	0	2000	164.744646	0	0
41	90	0	4000	100	0	0
42	91	0	4000	100	0	0
43	92	0	4000	100	200	4.2
44	99	0	4000	100	200	4.2
45	100	0	2000	396.825397	200	4.2
46	103	0	2000	2500	0	0
47	104	0	4000	100	0	0
48	105	0	4000	100	0	0
49	107	0	4000	100	0	0
50	110	0	4000	100	0	0
51	111	0	2000	2777.77778	0	0
52	112	0	4000	100	0	0
53	113	0	4000	100	0	0
54	116	0	4000	100	0	0

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 932-936

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Eş atomlu NiTi şekil hafızalı alaşımların geleneksel hızlarda frezelenmesinde işlenebilirlik performansı

Machinability performance when milling shape memory alloys at conventional speeds

Eren Kaya[1,*], İrfan Kaya[2]

[1,2] *Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 26555, Eskişehir, Türkiye*
[2] *İBİA Teknoloji, Anadolu Teknoloji Araştırma Parkı, 26555, Eskişehir, Türkiye*

Öz

NiTi şekil hafızalı alaşımlarının talaşlı imalatı, bu malzemelerin fonksiyonel özelliklerini koruyabilmek için özel bir hassasiyet gerektiren bir işlemdir. Uygun kesme parametrelerinin belirlenmesi ve etkili soğutma yöntemlerinin kullanılması, NiTi alaşımlarının talaşlı işlenmesi sırasında yüksek hassasiyetli ve kaliteli parçaların elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Farklı kesici takım malzemelerinin performanslarını değerlendirmek amacıyla çeşitli kesici uç malzemeleri kullanılmış olup, kesi uçların değiştirilebildiği takım sistemleri tercih edilmiştir. Geleneksel kesme hızları kapsamında Vc = 25, 50, 75 ve 100 m/dk değerleri incelenmiştir. Düşük kesme hızlarında, kesme hızının artışıyla birlikte takım ömrünün uzadığı gözlemlenmiştir. Bu eğilim, hem karbür hem de kaplamalı karbür kesici takımlar için geçerli bir durumdur.

Anahtar kelimeler: Frezeleme, NiTi, Takım aşınması, Kesici takım

Abstract

Machining NiTi shape memory alloy parts is a process that requires special care to avoid damaging the functional properties of these alloys. By choosing the right cutting parameters and using appropriate cooling methods, machining NiTi alloys can produce high quality and precision parts In order to examine the performance of various cutting tool materials, different insert materials were used and indexable insert cutting tools were preferred. Within the scope of conventional cutting speeds, Vc = 25, 50, 75, 100 m/min cutting speeds were investigated. In the range of low cutting speeds, it is observed that the tool life increases with increasing the cutting speed. This is true for both WC and coated WC cutting tools

Keywords: Milling, NiTi, Tool wear, Cutting tool

1 Giriş

Malzeme bilimi ve mühendisliğinde, son yüzyılda büyük atılımlar yapılarak malzemelerin mikro yapılarına dair derinlemesine anlayış sağlanmış ve üretim süreçlerinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Geçmişte, malzemelerden genellikle dayanıklılık beklenirken, yeni malzemelerin keşfiyle bu paradigma değişmiştir. Günümüzde daha rijit, hafif, dayanıklı ve fonksiyonel malzemelere ihtiyaç duyulması, "akıllı malzemeler" olarak da adlandırılan bir malzeme kategorisinin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Aktif malzemeler içerisinde gösterilen şekil hafızalı alaşımlar (ŞHA), belirli uyarılar aldıktan sonra asıl şekillerine geri dönebilen malzemelerdir. ŞHA'lar otomotiv [1, 2], havacılık ve uzay [3, 4] biyomedikal [5], iletişim [6, 7], kompozitler ve konstrüksiyon [8] ve mikro etkinleştiriciler [9, 10] gibi farklı uygulama alanlarında oldukça geniş bir endüstriyel yelpazede kullanılmaktadır. NiTi bazlı alaşımların, yüksek fonksiyonel performansları ve biyouyumluluk özellikleri sayesinde, bugüne kadar en fazla araştırılan ve kullanılan şekil hafızalı alaşımlar olduğu bilinmektedir [11].

Talaşlı imalat prosesi yüksek hassasiyetle parça üretebilme potansiyelinden dolayı en sık kullanılan imalat yöntemidir. NiTi ŞHA'ların işlenebilirlik performansı üzerine yapılan araştırmaların sayısı oldukça sınırlıdır [12, 13]. NiTi şekil hafızalı alaşımlar üzerinde gerçekleştirilen talaşlı imalat işlemleri, bu alaşımların fonksiyonel özelliklerine olumsuz yönde etki etmemek adına özel bir dikkat gerektirmektedir. Kesme parametrelerinin doğru şekilde belirlenmesi ve uygun soğutma yöntemlerinin uygulanmasıyla, NiTi alaşımlarının talaşlı imalat süreci yüksek hassasiyetli ve kaliteli parçaların üretimini mümkün kılabilir [14].

Huang, oda sıcaklığında austenit fazında bulunan Ni50.6Ti49.4 (at. %) alaşımının frezeleme işlemiyle işlenebilirlik yanıtlarını, kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği gibi parametrelerin etkileri doğrultusunda incelemiştir [12]. Kesme hızının Vc = 5 ile 50 m/dk arasında olması durumunda takım aşınmasının yüksek seviyede gerçekleştiği, Vc = 50 ile 200 m/dk arasında ise takım aşınmasının daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Guo ve çalışma arkadaşları, Ni50.8Ti49.2 alaşımının frezeleme işleminden sonra yüzey bütünlüğünü incelemek

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: erenkaya@eskisehir.edu.tr (E. Kaya)
Geliş / Received: 28.02.2025 Kabul / Accepted: 04.05.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1649015

amacıyla kaplamalı (AlTiN/TiN) tungsten karbür frezeleme takımları kullanarak bir araştırma yürütmüştür [15]. İncelenen kesme parametreleri şu şekildedir: ilerleme fr = 50 – 800 mm/dk, kesme hızı Vc = 200 m/dk, radyal paso ae = 0.251 mm, eksenel paso ap = 0,1 mm. Çalışmada belirlenen aşınma türleri yan yüzey aşınması, kaplama dökülmesi, çentik aşınması ve tane kopmasıdır. En iyi yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerinin, İlerleme olarak f = 200 mm/dk değeri kullanıldığında, en düşük yüzüy pürüzlülüğü değerinin elde edildiği bildirilmiştir.

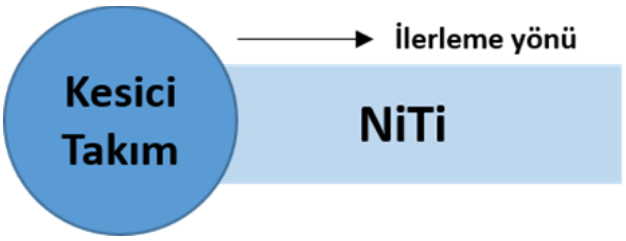
Eş atomlu NiTi özellikle biyomedikal alanında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada, literatürde henüz araştırılmamış olan, eş atomlu NiTi alaşımının frezeleme davranışları araştırılmıştır. Bununla beraber kesici takım kaplamasının işlenebilirlik üzerindeki etkilerinin araştırılması ise çalışmanın özgün değeridir.

2 Materyal ve metot

Bu çalışmada, Baoji Seabird Metal Material Co. Ltd. firması tarafından üretilen, vakum ark ergitme döküm ve sıcak haddeleme yöntemiyle elde edilen eş-atomik NiTi alaşımlar kullanılmıştır.

Frezeleme, kendi ekseni etrafında dönen bir kesici takım kullanılarak, tezgâha sabitlenen iş parçası üzerinden istenilen miktarda malzeme (talaş) kopartılan bir talaşlı imalat yöntemidir. Bu yöntemde, kesici takımın hareketleri ile iş parçasına nihai şekil kazandırılmaktadır. Yüzey frezeleme işlemleri, CNC kontrollü LER VQ 110 model, dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Frezeleme takımı, parçanın tüm yüzey genişliğini kapsayacak şekilde sabit değerde paso alarak ilerleme hareketi sağlamıştır (Şekil 2). Frezeleme deneylerinde ilerleme, eksenel kesme derinliği ve radyal kesme derinlikleri sabit tutulmuştur (f = 0.05 mm/dev, ap = 0.2 mm, ae = 20 mm).

Şekil 1. CNC kontrollü dik işleme merkezi



Şekil 2. Yüzey frezeleme

Çeşitli kesici takım malzemelerinin performanslarını incelemek için farklı kesici uç malzemeleri kullanılmış ve değiştirilebilir uçlu kesici takımlar tercih edilmiştir. Deneylerde TPKN ISO kodunda 3 kesici uç takılabilen takım tercih edilmiştir. Tüm takım konfigürasyonlarında BT50 takım tutucu kullanılarak tezgâh-takım bağlantısı sağlanmıştır. Tezgahtaki takım bağlantı şekli (spindle, takım tutucu ve kesici uç) Şekil 3'te gösterilmektedir.

Şekil 3. Freze tezgâhındaki kesici takım bağlantısı

Frezeleme işlemlerinde kaplamasız tungsten karbür ve çok katmanlı PVD kaplamalı tungsten karbür kesici takımlar kullanılmıştır. Kullanılan kesici takımlara ait bazı geometrik bilgiler Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Kesici takım parametreleri

Malzeme (Kalite)	Kesici uç ISO kodu	Takım çapı (mm)	Uç radyüsü (mm)	Talaş açısı (°)	Kesme kenarı açısı (°)
WC (K 68)	TPGN 220408	63	0.8	5	30
WC (PVD) (KCU 10)	TPGN 220408	63	0.8	5	30

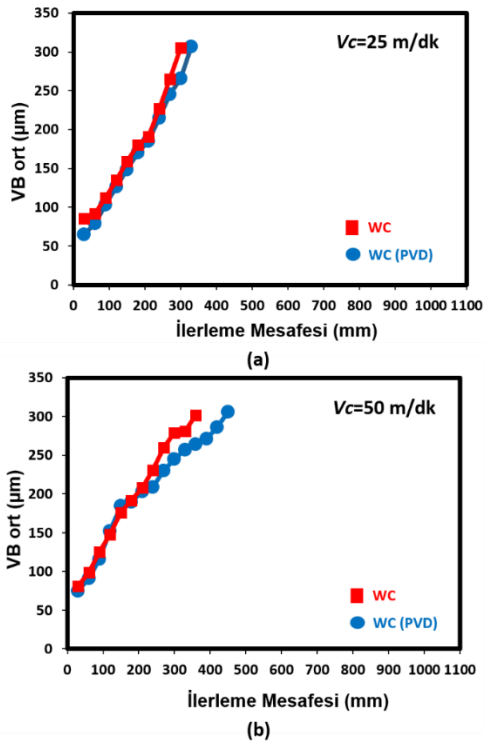
Deneylerde, kullanılan kesme hızları şunlardır; 25, 50, 75 ve 100 m/dk. Uygulanan deney matrisi Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Frezeleme deneylerindeki işleme parametreleri

Kesici uç malzemesi	Kesme hızı (m/dk)	İlerleme (mm/dev)	Eksenel kesme derinliği (mm)	Radyal kesme derinliği (mm)
Tungsten Karbür (PVD Kaplama)	25	0.05	0.2	20
Tungsten Karbür	25	0.05	0.2	20
Tungsten Karbür (PVD Kaplama)	50	0.05	0.2	20
Tungsten Karbür	50	0.05	0.2	20
Tungsten Karbür (PVD Kaplama)	75	0.05	0.2	20
Tungsten Karbür	75	0.05	0.2	20
Tungsten Karbür (PVD Kaplama)	100	0.05	0.2	20
Tungsten Karbür	100	0.05	0.2	20

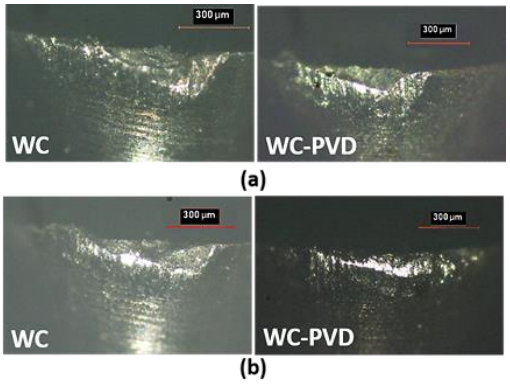
3 Bulgular ve tartışma

Şekil 4(a) ve 4(b)'de kaplamasız ve kaplamalı tungsten karbür (WC) kesici takımlar için sırasıyla Vc = 25 ve 50 m/dk kesme hızlarında meydana gelen yan yüzey aşınması ilerlemeleri ve takım ömürleri gösterilmiştir. Kesme hızı Vc = 25 m/dk olduğunda, WC ve kaplamalı WC takımlarda oluşan aşınma ilerlemesinin ve takım ömrünün oldukça yakın seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir. Kesme hızının Vc = 50 m/dk değerine attırılmasının ardından, her iki takım ömrünün, bir önceki kesme hızına göre artış gösterdiği görülmektedir. Bu durum talaşlı imalat literatüründe kabul gören termal yumuşama davranışından kaynaklanmaktadır [12]. Yine bu kesme hızında, kaplamanın etkisi ile aşınma direncinin artması kaynaklı olarak, iki takım arasındaki ömür farkının arttığı görülmektedir. Benzer durum Weinert vd. tarafından, NiTİ ŞHA'ların tornalama ve matkap ile delme araştırmasında da raporlanmıştır [16].

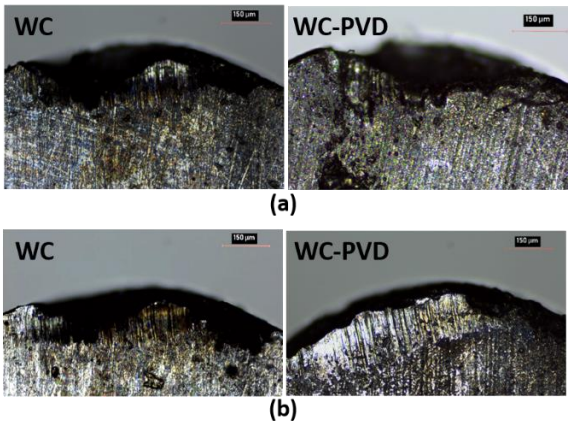


Şekil 4. a) 25 m/dk ve b) 50 m/dk kesme hızlarında ölçülen ilerleme mesafesi cinsinden takım ömrü ve ortalama yan yüzey aşınmaları

Şekil 5 ve Şekil 6'da, 150 mm uzunluğunda frezeleme işlemi sonrasında, düşük kesme hızlarında (25 ve 50 m/dk) WC ve kaplamalı WC kesici takımlarda meydana gelen yan yüzey ve talaş yüzeyi aşınmaları gösterilmektedir. Bu hızlarda, özellikle çentik aşınması, adezyon ve BUE oluşumunun belirgin olarak gerçekleştiği tespit edilmiştir. WC takımlarda adeziv aşınmanın, kaplamalı WC takımlara kıyasla daha belirgin olduğu görülmüştür. Talaş yüzeyi görüntülerinden, her iki takımda da parçacık kopması meydana geldiği anlaşılmıştır.

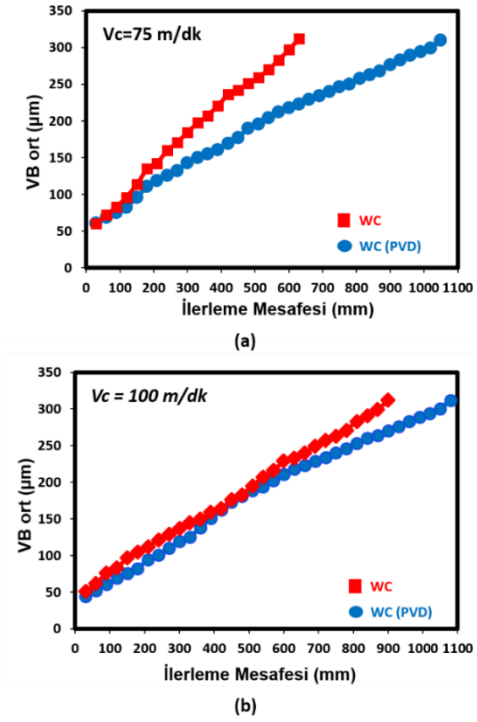


Şekil 5. a) 25 m/dk ve b) 50 m/dk kesme hızları için 150 mm uzunluğunda frezeleme işleminin ardından alınan yan yüzey görüntüleri [18]



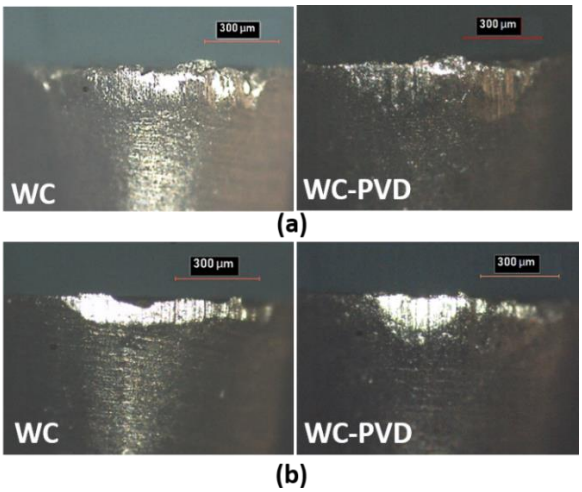
Şekil 6. a) 25 m/dk ve b) 50 m/dk kesme hızları için 150 mm uzunluğunda frezeleme işleminin ardından alınan talaş yüzeyi görüntüleri

75 ve 100 m/dk kesme hızlarına çıkıldığında WC ve kaplamalı WC kesici takımlarda meydana gelen aşınma ilerlemeleri ve takım ömürleri Şekil 7(a) ve 7(b)'de gösterilmektedir. Kesme hızı arttıkça, kaplamalı WC takımın daha uzun kesme ömrü sunduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, kaplamanın kesici yüzeyin yüksek sıcaklıklardaki sertliğini korumasından kaynaklanmaktadır [16]. Kesme hızı 100 m/dk değerine çıkarıldığında, kaplamalı WC takımla yapılan kesme deneyleri sonucunda en uzun takım ömrü (1080 mm) elde edilmiştir. Ancak bu hızın üzerine çıkıldığında takım ömründe düşüş meydana gelmiştir. WC kesici uç için en uzun takım ömrü ise 900 mm ile yine 100 m/dk kesme hızı ile işleme sonrasında görülmüştür. Bu durum, literatürle uyumlu olup, termal yumuşama etkisinin Vc = 100 m/dk civarında en üst düzeye ulaşmasından kaynaklanmaktadır. Huang, NiTi alaşımının frezelenmesinde, Vc = 100 m/dk kesme hızı değerinde minimum kesme kuvveti (5 N) ve yan yüzey takım aşınması (VB = 0.2 mm) gözlemlediğini bildirmiştir [12]. Benzer olarak Weinert ve Petzoldt, NiTi alaşımının kaplamalı karbür kesici takımla tornalanmasında, Vc = 100 m/dk kesme hızı değerinde minimum kesme kuvveti (50 N) ve yan yüzey takım aşınması (VB = 0.2 mm) değerlerini raporlamıştır [17].

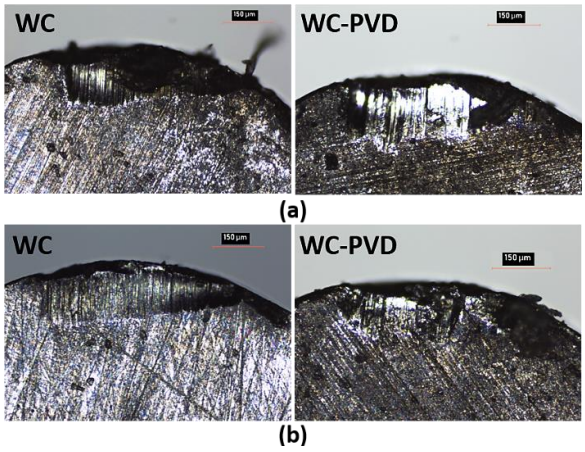


Şekil 7. a) 75 m/dk ve b) 100 m/dk kesme hızlarında ölçülen ilerleme mesafesi cinsinden takım ömrü ve ortalama yan yüzey aşınmaları

Şekil 8 ve Şekil 9'da sırasıyla 75 ve 100 m/dk kesme hızlarında, 150 mm uzunluğunda frezeleme işlemi sonrasında WC ve kaplamalı WC kesici takımlarda meydana gelen yan yüzey ve talaş yüzeyi aşınmaları gösterilmektedir. Kesme hızının 75 m/dk'ye çıkmasıyla çentik aşınmasında azalma meydana gelirken, parçacık dökülmesi sorunu devam etmiş ve abraziv aşınma daha baskın hale gelmiştir. Kesme hızının 100 m/dk'ye yükseltilmesiyle çentik aşınması tamamen ortadan kalkmış ve adezyon oluşumu önemli ölçüde azalmıştır. Benzer durum, NiTi alaşımının tornalanmasında da bildirilmiştir [16].



Şekil 8. a) 75 m/dk ve b) 100 m/dk kesme hızları için 150 mm uzunluğunda frezeleme işleminin ardından alınan yan yüzey görüntüleri



Şekil 9. a) 75 m/dk ve b) 100 m/dk kesme hızları için 150 mm uzunluğunda frezeleme işleminin ardından alınan talaş yüzeyi görüntüleri

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, NiTi şekil hafızalı alaşımlarının geleneksel hızlarda frezeleme sürecindeki işlenebilirlik performansı deneysel olarak değerlendirilmiştir. Kaplamalı ve kaplamasız tungsten karbür kesici takımlar kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada, düşük kesme hızlarında hem tungsten karbür hem de kaplamalı tungsten karbür kesici takımlar için takım ömrünün kesme hızına bağlı olarak arttığı tespit edilmiştir. Bu durum, talaşlı imalatta yaygın olarak kabul gören termal yumuşama etkisiyle açıklanmaktadır.

Takım aşınma analizlerinde etkin aşınma mekanizmaları adezyon, abrazyon ve difüzyon olarak belirlenmiştir. Tespit edilen aşınma türleri arasında yan yüzey aşınması, BUE, talaş yüzeyi aşınması, çentik aşınması, parçacık kopması, kenar kırılması ve plastik deformasyon öne çıkmıştır. Kesme hızının 75 m/dk'ye çıkarılması çentik aşınmasını azaltırken, 100 m/dk'ye yükseltilmesi çentik aşınmasını tamamen ortadan kaldırmış ve adezyon oluşumunu önemli ölçüde düşürmüştür.

Teşekkür

Bu çalışma, Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 19ADP141 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %16

Kaynaklar

[1] D. Stoeckel, Shape memory actuators for automotive applications. Materials & Design, 11(6), 302-307, 1990. https://doi.org/10.1016/0261-3069(90)90013-A

[2] F. Butera, A. Coda and G. Vergani, Shape memory actuators for automotive applications. Nanotec IT newsletter. Roma: AIRI/nanotec IT, 12-6, 2007.

[3] C. Bil, K. Massey, and E.J. Abdullah, Wing morphing control with shape memory alloy actuators. Journal of

Intelligent Material Systems and Structures, 24(7), 879-898, 2013.https://doi.org/10.1177/1045389X12471866

[4] D.J. Hartl, and D.C. Lagoudas, Aerospace applications of shape memory alloys. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 221(4), 535-552, 2007. https://doi.org/10.1243/09544100JAERO211

[5] L. Petrini and F. Migliavacca, Biomedical applications of shape memory alloys. Journal of Metallurgy, 2011. https://doi.org/10.1155/2011/501483

[6] A. Kaya, İ. Kaya and H.E. Karaca, U-Shape Slot Antenna Design with High-Strength Ni54Ti46 Alloy. Arabian Journal for Science and Engineering, 41(9), 3297-3307, 2016. https://doi.org/10.1007/s13369-015-1819-2

[7] A. Kaya, İ. Kaya and H.E. Karaca, Radio Frequency U-Shape Slot Antenna Design with Niti Shape Memory Alloys. Microwave and Optical Technology Letters, 55(12), 2976-2984, 2013. https://doi.org/10.1002/mop.27977

[8] Y. Furuya, Design and material evaluation of shape memory composites. Journal of intelligent material systems and structures, 7(3), 321-330, 1996. https://doi.org/10.1177/1045389X9600700313

[9] M. Kohl, E. Just, W. Pfleging and S. Miyazaki, SMA microgripper with integrated antagonism. Sensors and Actuators A: Physical, 83(1), 208-213, 2000. https://doi.org/10.1016/S0924-4247(99)00385-4

[10] H. Kahn, M. Huff and A. Heuer, The TiNi shape-memory alloy and its applications for MEMS. Journal of Micromechanics and Microengineering, 8(3), 213, 1998. https://doi.org/10.1088/0960-1317/8/3/007

[11] M.H. Elahinia, M. Hashemi, M., Tabesh and S.B. Bhaduri, Manufacturing and processing of NiTi implants: a review. Progress in materials science, 57(5), 911-946, 2012. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2011.11.001

[12] H. Huang, A study of high-speed milling characteristics of nitinol. Materials and Manufacturing Processes, 19(2), 159-175, 2004. https://doi.org/10.1081/AMP-120029849

[13] K. Weinert and V. Petzoldt, Machining of NiTi based shape memory alloys. Materials Science and Engineering: A, 378(1), 180-184, 2004. https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.344

[14] E.O. Ezugwu, J. Bonney and Y. Yamane, An overview of the machinability of aeroengine alloys. Journal of Materials Processing Technology, 134(2), 233-253, 2003. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)01042-7

[15] Y. Guo, A. Klink, C. Fu and J. Snyder, Machinability and surface integrity of Nitinol shape memory alloy. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 62(1), 83-86, 2013. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.004

[16] K. Weinert, V. Petzoldt and D. Kötter, Turning and drilling of NiTi shape memory alloys. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 53(1), 65-68, 2004. https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60646-5

[17] K. Weinert and V. Petzoldt, Machining of NiTi based shape memory alloys. Materials Science and Engineering: A, 378(1), 180-184, 2004. https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.344

[18] E.Kaya, Farklı kesici takım malzemeleri kullanarak NiTi şekil hafızalı alaşımların işlenebilirlik davranışlarının araştırılması ve performans parametrelerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Türkiye, 2019.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 937-942

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Lomax sönümlenmeli kanalların etkin verimlilik analizi

Effective throughput analysis of Lomax fading channels

Mehmet Bilim[1], **Yasin Kabalcı** [2,*]

[1,2] *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye*

Öz

Yakın zamanda önerilen Lomax sönümlenmesinin karakteristik olarak gerçek-zamanlı ortamların sönümlenme koşullarını iyi temsil ettiği ve pratik uygulamaların analizlerinde oldukça faydalı olabileceği öngörülmektedir. Bu çalışmada, Lomax sönümlemeli kanallar altındaki tek giriş tek çıkışlı iletişim sistemlerinin etkin verimlilik analizleri gerçekleştirilmiştir. Etkin verimlilik analizinin analitik ifadesi, Meijer *G* fonksiyonu cinsinden kapalı formda türetilmiştir. Meijer *G* fonksiyonu, kablosuz haberleşme sistemlerinde farklı performans analizleri için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca çalışmada türetilen analitik ifadelerin doğruluğunu kanıtlamak için tam değer simülasyon sonuçları ile analitik sonuçlar farklı senaryolar göz önünde bulundurularak kapsamlı şekilde karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular ile çalışmada önerilen analitik ifadenin doğruluğu teyit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Lomax sönümlemeli kanal, Etkin verimlilik analizi, Meijer *G* fonksiyonu.

Abstract

The recently proposed Lomax fading model is anticipated to effectively represent the fading conditions of real-time environments and be highly beneficial for the analysis of practical applications. In this study, the effective throughput analysis of single-input single-output (SISO) communication systems operating under Lomax fading channels is conducted. The analytical expression for the effective throughput is derived in closed form in terms of the Meijer-G function, which is widely utilized in various performance analyses of wireless communication systems. Furthermore, to validate the accuracy of the derived analytical expressions, the exact simulation results are comprehensively compared with the analytical findings under different scenarios. The obtained results confirm the accuracy of the proposed analytical expression.

Keywords: Lomax fading channel, Effective throughput analysis, Meijer-*G* function.

1 Giriş

Kablosuz iletişim kanallarının istatistiksel modellenme süreci, son yirmi yıl içerisinde önemli ölçüde gelişmiş bir bilim ve mühendislik alanıdır [1-3]. Bu gelişim, büyük ölçüde iletişim ağları ve sistemlerindeki hızlı ilerlemeler ile bu sistemlerin performansına yönelik yüksek doğrulukta öngörülerin gerekliliğinden kaynaklanmaktadır [4, 5]. Bu bağlamda kanal modellemesi; beşinci nesil yeni radyo (fifth generation new radio, 5G NR) [6], altıncı nesil (sixth generation, 6G) [7], araçtan her şeye (vehicular-to-everything, V2X) [8], Wi-Fi 7 [9], Wi-Fi 8 ve sonrası [10] ile insansız hava aracı (unmanned aerial vehicle, UAV) sistemleri [11, 12] gibi kablosuz bağlantı bozulmalarına karşı duyarlı olan özel iletişim sistemlerinin analizi açısından oldukça önem arz etmektedir. Her ne kadar geniş kapsamlı kanal ölçüm deneyleri gerçekleştirilmiş olsa da, yayılım koşullarındaki çeşitlilik ve karakteristikler, iletişim kanal modellerinin istatistiksel tanımlamalarının birleştirilmesini ve genelleştirilmesini zorlaştırmaktadır [13]. Lomax dağılımının avantajlarından bahsedilirse, küçük ölçekli sönümlenme için güzel bir matematiksel tanımlama yapmaktadır. Kablosuz haberleşme alanında küçük ölçekli sönümlenme durumu sıklıkla karşılaşılabilen bir durumdur. Özellikle, şehir içi kablosuz iletişimde ve bina içi kablosuz kanal ortamlarında pratik uygulamalarda küçük ölçekli sönümlenme karşımıza çıkmaktadır. Bu sebeple, Lomax sönümlenmesi önemli bir kablosuz kanal modelidir. Bu alanda önerilen model sayısında önemli bir artış, Yacoub ve çalışma arkadaşlarının öncü çalışmalarıyla başlamış [14-18] ve günümüzde en karmaşık modellerden [19] en basit modellere [20, 21] kadar geniş bir yelpazede devam etmiştir. [14-19]'da önerilen kanal modelleri Lomax sönümlenmesi benzer şekilde pratik uygulamalara yönelik kanal modellemesini amaçlamakta ancak farklı matematiksel tanımlamalara sahiptir. Bu çalışmalar, birbirlerine göre gelişim göstermekte ve farklı özellikleri içeren parametreler içermektedir. Örneğin, [18]'de κ ve μ gibi veya [19]'daki α, η, κ ve μ şeklindedir. Buradaki parametreler her bir kanal modeline göre farklı fiziksel özelliklere aittir. Mevcut modeller, pratikte karşılaşılan birçok kanal türünü kapsamakla (genelleştirilmiş model olmakla) birlikte, zayıf yayılım koşullarını temsil eden ağır sönümleme senaryolarının modellenmesine yönelik yoğun çabalar da sarf edilmiştir. Bu tür senaryolar genellikle ağır kuyruklu dağılımlar ile tanımlanmakta olup, en güncel örneklerden biri Lomax kanal modelidir. Özellikle [20] numaralı çalışmada, kablosuz iletişim için en basit formda modellemeye odaklanılmıştır [13].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: yasinkabalci@ohu.edu.tr (Y. Kabalcı)
Geliş / Received: 08.04.2025 Kabul / Accepted: 09.05.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1672185

Lomax kanal modeli, zayıflayan bir kablosuz iletişim kanalının istatistiksel etkilerini tanımlamak amacıyla Sanchez ve López-Martínez tarafından 2024 yılında önerilmiştir [20]. Araştırmacılar çalışmalarında, hem pratik açıdan değerli senaryoları ele alabilecek hem de karmaşık fonksiyonlara başvurmadan kapalı formda analitik olarak çözümlenebilir, basitleştirilmiş bir model türetmeyi hedeflemiştir. Çalışmalarında, sistem performans analizinde gerekli olan tüm temel istatistiksel özelliklerin (olasılık yoğunluk fonksiyonu (probability density function, PDF), kümülatif dağılım fonksiyonu (cumulative distribution function, CDF), ters CDF fonksiyonu (inverse CDF, ICDF), ham momentler, moment üreten fonksiyon (moment generating function, MGF) ve genelleştirilmiş MGF (generalized MGF, GMGF) gibi) kapalı formda ifade edilebildiğini göstermişlerdir. Bu yönüyle Lomax modeli; Rician, Nakagami-*m* ve Hoyt dağılımları gibi klasik sönümleme dağılımlarına kıyasla önemli avantajlar sağlamaktadır [13].

Bununla birlikte, [20] çalışması yalnızca Lomax kanalının istatistiksel tanımını sunmakla kalmamış, aynı zamanda kanal performans metriklerinin çoğunu da incelemiştir. Bu metrikler arasında ortalama bit hata oranı (average bit error rate, ABER), ergodik kapasite (ergodic capacity, EC) ve kesinti olasılığı (outage probability, OP) yer almaktadır. Lomax kanal modelinin en önemli özelliklerinden biri, her zaman hiper-Rayleigh rejiminde (HRR), en azından zayıf HRR durumunda olmasıdır. Bu özelliği sayesinde, özellikle modern kentsel kablosuz haberleşme sistemleri açısından kritik öneme sahip olan ağır sönümleme koşullarını başarılı bir şekilde tanımlayabilmektedir. Bu durum, Lomax modelinin ağır kuyruklu dağılımlar sınıfına ait olmasıyla doğrudan ilişkilidir. Ağır kuyruklu dağılımlar, genellikle zayıf yayılım koşullarını temsil etme eğilimindedir [13].

Etkin verimlilik (effective throughput, ET), literatürde ilk kez hizmet kalitesi (quality-of-service, QoS) metriği olarak kablosuz bağlantıların performansını tanımlamak amacıyla önerilmiş olup, etkin kapasite olarak da bilinmektedir [22]. Bu doğrultuda, farklı haberleşme ağlarının değişik sönümleme ortamlarındaki ET performansı literatürde farklı kanal modelleri için kapsamlı bir şekilde incelenmiştir [23-29]. Bileşik $\alpha-\eta-\mu$/gamma sönümleme kanalının ET performansı, karışım Gamma ve karışım Gauss dağılımları kullanılarak analiz edilmiştir [23, 24] numaralı çalışmada, MGF yaklaşımı temel alınarak genelleştirilmiş sönümleme ortamlarında ET performansı incelenmiştir. Zhang ve çalışma arkadaşları, tek girişli tek çıkışlı (single-input single-output, SISO) bir haberleşme sisteminin $\kappa-\mu$ gölgelenmiş sönümleme koşulları altındaki ET performansını analiz etmişlerdir [25, 26] numaralı çalışmada, tipik olarak akıllı şebeke haberleşme sistemleri için ET performansı değerlendirilmiştir. Benzer şekilde, SISO bir sistemin Fisher-Snedecor *F* sönümleme kanalları üzerindeki ET performansı incelenmiştir [27]. Çok girişli tek çıkışlı (multiple-input single-output, MISO) iletişim ağları için ise $\alpha-\mu$ ve $\kappa-\mu$ sönümleme kanallarında ET performansları sırasıyla [28] ve [29] numaralı çalışmalarda analiz edilmiştir [30]. [23-30]'daki çalışmalarda farklı küçük sönümlenmeleri ele alan kanal modellerinin farklı analizleri sunulmuştur. Bu kanal modellerinde birleşik sönümlenme örnekleri de sunulmuştur. Ancak [23-30]'daki çalışmalarda Lomax sönümlenmesi ele alınmamıştır. Daha önce bahsedilen Lomax sönümlü kanalların avantajları göz önüne alındığında ET analizinin yapılması literatüre katkı açısından önemli bir konu ve gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Sunulan çalışmanın yapılma gerekliliğini de bu şekilde izah edilebiliriz.

Daha önceki çalışmalarda, SISO veya MISO ağların ET performansı çeşitli sönümleme kanalları altında incelenmiştir. Yukarıda belirtilen bazı çalışmalar da dahil olmak üzere, $\alpha-\eta-\mu$/gamma, $\alpha-\mu$, $\kappa-\mu$, $\kappa-\mu$ gölgelenmiş ve Fisher-Snedecor *F* gibi sönümleme modelleri ele alınmıştır. Ancak, yazarların bildiği kadarıyla, 2024 yılında önerilen Lomax kanalı şartlarında çalışan SISO ağlarının ET performansını inceleyen bir çalışma henüz literatürde bulunmamaktadır. Etkin verimlilik analizi ile Lomax sönümlenmesinin kablosuz haberleşme sistemlerinde kullanılabilirliği ortaya konulmuş olacak ve bu kanal modelinin faydaları daha net bir şekilde anlaşılacaktır. Literatürde etkin verimlilik analizi, temel inceleme parametrelerinden olup, sönümlü kanallarda önemli bir konu olarak araştırmacılar tarafından ele alınmaktadır. Bu çalışma ile bu önemli konu Lomax sönümlenmesinde incelenmiştir. Lomax sönümleme koşulları altında çalışan SISO sistemlerinin ET performansına yönelik analizlerin literatürdeki eksikliğinden hareketle, bu çalışmada söz konusu sistemin ET performansı Meijer *G* fonksiyonunu kullanılarak incelenmiştir. Meijer *G* fonksiyonu, kablosuz haberleşme sistemlerinde farklı performans analizleri için yaygın olarak kullanılmaktadır. Elde edilen analitik etkin verimlilik ifadesi ile tam simülasyon sonuçlarının kıyaslaması nümerik sonuçlarda verilmiştir. Bu sonuçlar incelediğinde, sonuçlar birbiri ile tam uyumluluk gösterdiği ve yapılan analizi doğruluğunun ispatlanmış olduğu anlaşılmaktadır.

2 Sistem modeli

Bu çalışmada ele alınan sistem modeli geleneksel SISO tek antenli bir model olup, verici-alıcı arasındaki sönümlenme son dönemlerde popüler ve oldukça yeni bir sönümlü kanal çeşidi olan Lomax sönümlenmesidir. Verici-alıcı arasındaki sönümlenme katsayılarının Lomax dağılımına sahip olduğu ve düz bir sönümlenmeyi içerdiği varsayılmıştır. Lomax sönümlenmesi, son dönemlerde [20] numaralı çalışma ile ortaya çıkmış ve araştırmacılar tarafından ilgi görmeye başlamıştır. Lomax sönümlenmesinin karakteristik olarak gerçek-zamanlı ortamların sönümlenme koşullarını iyi temsil ettiği ve pratik uygulamaların analizlerinde oldukça faydalı olabileceği öngörülmektedir. Bu önemli avantajları üzerinde barındırdığı için Lomax sönümlü kanal ortamı bu çalışmada ele alınan sistem modeli için tercih edilmiştir. Buna göre, düşünülen sistem için ET, bir diğer tabir ile efektif kapasite analizi bu çalışmanın araştırma konusudur. Etkin verimlilik analizi ile Lomax sönümlenmeli durumların etkileri ve sistemde var olan parametrelerin performans üzerindeki etkileri analitik ifadeler ile sunulmuştur.

3 Etkin verimlilik analizi

Bu çalışmada değerlendirilen SISO iletişim sistemi için kanal sönümlenme modeli Lomax olduğundan, anlık işaret gürültü oranının (signal-to-noise ratio, SNR) PDF $\left(f_\gamma(\gamma)\right)$ ifadesine ihtiyaç duyulmaktadır. $f_\gamma(\gamma)$ ifadesi, Lomax sönümlenmesi için şu şekilde ifade edilir [20]:

$$f_\gamma(\gamma)=\frac{\alpha}{\bar{\gamma}(\alpha-1)}\left[1+\frac{\gamma}{\bar{\gamma}(\alpha-1)}\right]^{-(\alpha+1)} \tag{1}$$

burada α şekillendirme parametresi, $\gamma\sim\text{Lomax}(\alpha,\lambda)$ Lomax dağılımlı rastgele değişkeni, λ ise ölçeklendirme parametresini ifade ederken, $\lambda=\bar{\gamma}(\alpha-1)$ olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca $\bar{\gamma}$ ortalama SNR'yi temsil eder ve

$$\bar{\gamma}=\frac{P_T S_T}{N_0} \tag{2}$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada P_T iletim gücünü, S_T de sistemde var olan toplam kayıpları temsil ederken, N_0 ise eklenebilir beyaz Gauss gürültü (additional white Gaussian noise, AWGN) terimini belirtmektedir. ET ise kablosuz haberleşmede analitik olarak şu şekilde hesaplanmaktadır [3], [30]:

$$ET=-\frac{1}{A}\log_2\left(\text{E}\left[(1+\gamma)^{-A}\right]\right),\ \text{bit/s/Hz} \tag{3}$$

burada $\text{E}[\cdot]$ beklenen değer, $A=\delta\phi B/\ln 2$ şeklinde tanımlanmaktadır. ϕ veri blok uzunluğunu, δ ise doluluk oranının azalmasıdır ve B bant genişliğini ifade etmektedir. Sayısal ikili iletim söz konusu olduğu için ln2 taban dönüşümü kullanılmıştır. O zaman ET ifadesi aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir:

$$ET=-\frac{1}{A}\log_2\left(\frac{\alpha}{\bar{\gamma}(\alpha-1)}I\right) \tag{4}$$

Denklem (4) ile sunulan ifadedeki I terimi içerisinde Lomax $f_\gamma(\gamma)$ ifadesinden ötürü bir kısım bileşenleri ihtiva eden bir integrali temsil etmekte ve şu şekilde yazılmaktadır:

$$I=\int_0^\infty(1+\gamma)^{-A}\left[1+\frac{\gamma}{\bar{\gamma}(\alpha-1)}\right]^{-(\alpha+1)}d\gamma \tag{5}$$

Denklem (5) ile verilen integralin direkt olarak çözümü yazarların bildiği kadarıyla bulunmamaktadır. Bu sebeple, ilgili ET ifadesini türetebilmek için literatürdeki analitik çalışmaların yaptığı gibi, burada ilgili bazı dönüşümler kullanılmaktadır. Buna göre, integrali oluşturan iki bileşen için şu dönüşümlerden faydalanılmaktadır. Bunlar:

$$(1+\gamma)^{-A}=\frac{1}{\Gamma(A)}G_{1,1}^{1,1}\left(\gamma\middle|\begin{matrix}1-A\\0\end{matrix}\right) \tag{6}$$

$$\left(1+\frac{\gamma}{\bar{\gamma}(\alpha-1)}\right)^{-(\alpha+1)}=\frac{1}{\Gamma(\alpha+1)}G_{1,1}^{1,1}\left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}(\alpha-1)}\middle|\begin{matrix}-\alpha\\0\end{matrix}\right) \tag{7}$$

şeklinde sıralanmaktadır. Burada $G_{\cdot,\cdot}^{\cdot,\cdot}(\cdot|\cdot)$ Meijer G fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır ve Mathematica yazılım programında yerleşik tanımlı fonksiyonlardan biridir. Wolfram, yazılım olarak çok önceki Mathematica versiyonlarından beri bu fonksiyonu kullanıcıların hizmetine sunmuştur. Burada $(1+\gamma)^{-A}$ ve $\left(1+\frac{\gamma}{\bar{\gamma}(\alpha-1)}\right)^{-(\alpha+1)}$ ifadelerini Meijer G fonksiyonu cinsinden verilmesinin nedeni, Meijer G ifadesinin kullanımı ile Denklem (5)'in çözülebilir hale getirmek ve daha öncede vurgulandığı gibi Mathematica'da bu fonksiyonun temel olarak tanımlı olması şeklinde belirtilebilir. Bu sayede arzu edilen ET analizinin yapılabilmesi Meijer G fonksiyonu cinsinden tanımlanma ile sağlanabilmektedir. Denklem (6) ve (7)'deki dönüşümler [[31], Denklem (8.4.2.5)]'den eşleştirilerek yazılmıştır. İlgili dönüşümler kullanılarak Denklem (5)'teki I integrali tekrardan aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$I=\frac{1}{\Gamma(A)\Gamma(\alpha+1)}\underbrace{\int_0^\infty G_{1,1}^{1,1}\left(\gamma\middle|\begin{matrix}1-A\\0\end{matrix}\right)G_{1,1}^{1,1}\left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}(\alpha-1)}\middle|\begin{matrix}-\alpha\\0\end{matrix}\right)d\gamma}_{J} \tag{8}$$

Dönüşüm sonucunda elde edilen Denklem (8)'deki J integrali [[32], Denklem (7.811.1)] ile sunulan forma sahiptir ve çözümü aşağıdaki şekildedir:

$$\begin{aligned}W&=\int_0^\infty G_{p,q}^{m,n}\left(\eta x\middle|\begin{matrix}a_1,\ldots,a_p\\b_1,\ldots,b_q\end{matrix}\right)G_{\sigma,\tau}^{\mu,\nu}\left(wx\middle|\begin{matrix}c_1,\ldots,c_\sigma\\d_1,\ldots,d_\tau\end{matrix}\right)dx\\&=\frac{1}{\eta}G_{q+\sigma,p+\tau}^{n+\mu,m+\nu}\left(\frac{w}{\eta}x\middle|\begin{matrix}-b_1,\ldots,-b_m,c_1,\ldots,c_\sigma,-b_{m+1},\ldots,-b_q\\-a_1,\ldots,-a_n,d_1,\ldots,d_\tau,-a_{n+1},\ldots,-a_p\end{matrix}\right)\end{aligned} \tag{9}$$

Buna göre Denklem (9) ile verilen çözüm kullanılarak ve Denklem (8)'deki J ifadesinin gerekli eşleştirmeleri matematiksel olarak yapıldığında,

$$J=G_{2,2}^{2,2}\left(\frac{1}{\bar{\gamma}(\alpha-1)}\middle|\begin{matrix}0,-\alpha\\A-1,0\end{matrix}\right) \tag{10}$$

sonucu elde edilir. Denklem (10), Denklem (8)'de yerine yazılarak

$$I = \frac{1}{\Gamma(A)\Gamma(\alpha+1)} G_{2,2}^{2,2}\left(\frac{1}{\bar{\gamma}(\alpha-1)} \middle| \begin{matrix} 0,-\alpha \\ A-1,0 \end{matrix} \right) \quad (11)$$

elde edilir. Buna göre Denklem (11)'de elde edilen I ifadesi, Denklem (4)'te yerine konulursa ele alınan sistem için etkin verimlilik ifadesi analitik olarak aşağıdaki gibi türetilmiş olur:

$$ET = -\frac{1}{A}\log_2\left(\Delta G_{2,2}^{2,2}\left(\frac{1}{\bar{\gamma}(\alpha-1)} \middle| \begin{matrix} 0,-\alpha \\ A-1,0 \end{matrix} \right) \right) \quad (12)$$

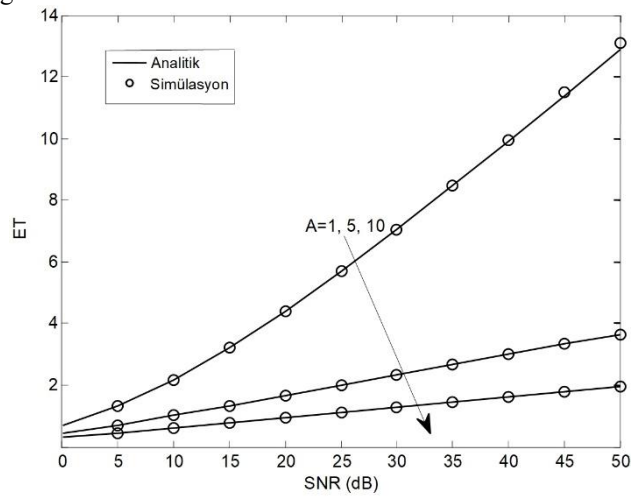
Burada $\Delta = \dfrac{\alpha}{\bar{\gamma}(\alpha-1)\Gamma(A)\Gamma(\alpha+1)}$ olarak bulunmuştur.

4 Nümerik sonuçlar

Lomax sönümlü kanal modelleri özellikle zor şartlar olarak bilinen yıkıcı sönümlü durumlar için kullanışlıdır. Burada, yıkıcı sönümleme ile iletişim kanalının büyük zayıflama değerlerine sahip olma olasılığının daha yüksek olma durumu kastedilmektedir. Bununla beraber, kablosuz iletişimde gölgeleme etkileri ve çok yollu yayılma gibi durumların modellenmesinde de yine bu dağılımın kullanılabileceği öne sürülmektedir [20]. Lomax dağılımında var olan α şekillendirme parametresi ile λ ise ölçeklendirme parametresi bu etkilerinin analitik olarak ayarlanmasında kullanılmaktadır. Bütün açıklamalar doğrultusunda bu alt bölümde, ET değerinin ortalama SNR'ye bağlı olarak değişimlerini içeren 3 farklı örnek durum ve bunlara ait grafikler sunulmuştur. Sunulan bütün grafiklerde açıkça görülmektedir ki, üçüncü bölümde elde edilen ET analitik ifadesinin kullanımı sonucunda elde edilen nümerik değerler ile bu ifadelerin tam değer simülasyon sonuçları birebir uyumlu bir davranış sergilemektedir. Şekillerde analitik sonuçlar düz çizgi ile temsil edilirken, tam bilgisayar simülasyonu sonuçları ise daire simgeleriyle gösterilmektedir.

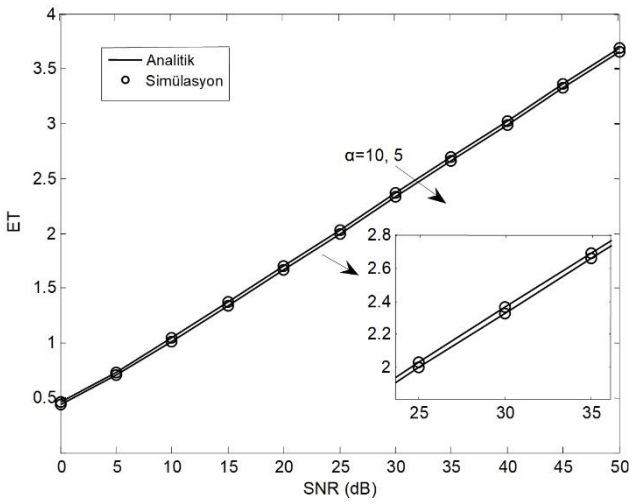
Şekil 1'de ET ifadesinde kullanılan veri blok uzunluğu, doluluk oranının azalması ile bant genişliğine bağlı olarak $A = \delta\phi B / \ln 2$ ifade edilen A değerinin farklı alınması durumları kapsamlı şekilde incelenmiştir. A değeri literatürdeki çalışmalardakilere benzer şekilde sırasıyla 1, 5 ve 10 olarak alınmış ve ET değişimleri sunulmuştur. Buna ek olarak $\alpha = 5$ olarak alınmıştır. Şekil 1 ile sunulan grafikten, A değeri arttıkça ET performansının azaldığı açıkça görülmektedir. Bu durumun nedeni A değerinin azalması, A ifadesindeki pay ifadesinin azalması anlamına gelmekte, bunun sonucunda ise veri blok uzunluğu, doluluk oranı ve bant genişliği terimlerinden birinin azalması durumu meydana gelmektedir. Bu ifadelerin herhangi biri, örnek olarak bant genişliği, azaldığında beklenildiği gibi ET performansı azalmaktadır.

Diğer taraftan, α şekillendirme parametresinin ET üzerindeki etkisinin incelenmesi durumu Şekil 2 ile verilmiştir. Burada $A = 5$ olarak alınmış olup, α değeri ise sırasıyla 10 ve 5 alınmıştır. Şekil 2'den de görüldüğü gibi, α parametresinin ET üzerindeki etkisi A'ya göre daha minör bir etkiye sahiptir. Diğer taraftan Şekil 1'de A'nın değişiminin ET performansına daha fazla etkide bulunduğu gözlemlenmektedir.



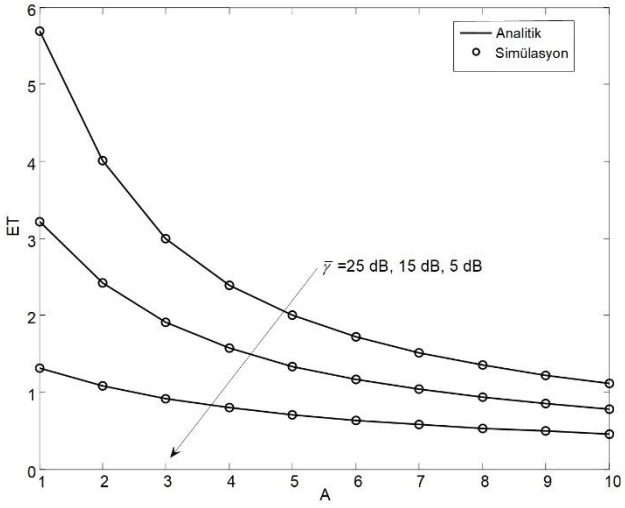
Şekil 1. Farklı A değeri için ET eğrilerinin değişimi.

Bununla birlikte, α değerinin artması ET üzerine olumlu etki göstermiştir. α değeri arttıkça Lomax kanal ortamı daha az sönümlenme etkisine sebep olacağı için ET performansı daha iyi olmaktadır.



Şekil 2. Farklı α değerleri için ET eğrilerinin değişimi.

Son olarak, Şekil 3'te farklı ortalama SNR, $\bar{\gamma}$, değerlerinin ET üzerindeki etkisi A'ya göre değişimi sunularak gösterilmiştir. Buna göre yüksek ortalama SNR değerinde beklenildiği gibi, kullanılan iletim enerjisi fazla olacağından ötürü daha iyi bir ET performansı elde edilmektedir. Şekil 3'te eğrilerin davranışları gözlemsel olarak matematiksel açıdan değerlendirildiğinde iç-bükey şekildedir. Bunun da sebebi, ET-A değişimi ele alındığından ve yatay eksende A değeri arttığı için ET performansı yatay eksene asimptotik olarak yaklaşım sergilemesinden dolayıdır.



Şekil 3. Farklı ortalama SNR, $\bar{\gamma}$, değerleri için ET eğrilerinin değişimi.

5 Sonuçlar

Bu çalışmada, ele alınan iletişim sisteminin ET performansı için kapalı formlu bir ifade Lomax sönümlemeli kanal ortam şartlarında türetilmiştir. Çalışmanın temel amacı, yeni bir sönümlenme modeli olan Lomax kanal modelinin ET analizini matematiksel olarak ortaya koymaktır. Türetilen matematiksel ifadenin analizi, A, α, $\bar{\gamma}$ gibi çeşitli parametrelerin ET performansı üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla detaylı şekilde değerlendirilmiştir. Sunulan sonuçlarda, α parametresinin değişiminin $\bar{\gamma}$ ve A parametrelerinin değişimine göre ET performansları üzerindeki etkisi daha minör olarak görülmektedir. Diğer bir ifadeyle, α parametresindeki değişim ile ET performansı daha az bir değişim sergilerken, $\bar{\gamma}$ ve A değişimleri ET'de daha belirgin bir farklılık göstermektedir. Nümerik olarak bunların gözlemlenmesi, sunulan grafiklerde açıkça görülmesi mümkündür. Farklı Lomax ve ET parametreleri ile Lomax sönümlü kanal modelinin incelenmesi bu çalışmada gerçekleştirilmiştir. Önerilen matematiksel ifade kullanılarak elde edilen analitik bulguların, tam değer simülasyon sonuçları ile son derece tutarlı olduğu elde edilen grafik sonuçları ile açıkça gözlemlenmiştir. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar, çalışmada önerilen analitik ifadenin doğruluğunu teyit etmektedir. Gelecek çalışmalar açısından çalışmanın geliştirilebilir yönleri, güncel ve farklı sönümlü kanal modelleri ile kıyaslamak için farklı kanal modelleri ele alınabilir. Örneğin $\alpha - F$, Pareto, log-normal vs. gibi farklı kanal modellerinin de ET analizi yapılıp kıyaslamaları sunulabilir. Buna ilaveten, Lomax sönümlü kanal modelinde gizlilik kapasitesi veya yüksek seviyeli modülasyon incelemeleri de gerçekleştirilebilir. Ayrıca, uyarlanabilir akıllı yüzey teknolojilerini kullanan haberleşme sistemlerinin Lomax sönümlü kanal modellerinde analizlerinin de yapılması mümkündür.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %12

Kaynaklar

[1] J. F. Paris, Advances in the statistical characterization of fading: From 2005 to present, International Journal of Antennas and Propagation. 2014(1), 1–5, 2014. https://doi.org/10.1155/2014/ 258308.

[2] P. M. Shankar, fading and shadowing in wireless systems. Cham: Springer International Publishing, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53198-4.

[3] M. K. Simon and M.-S. Alouini, Digital communication over fading channels, 2. ed. in Wiley series in telecommunications and signal processing. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2005.

[4] S. Liu, X. Yu, R. Guo, Y. Tang, and Z. Zhao, THz channel modeling: Consolidating the road to THz communications, China Commun., 18(5), 33–49, May 2021. https://doi.org/10.23919/JCC.2021.05. 003.

[5] D. Serghiou, M. Khalily, T. W. C. Brown, and R. Tafazolli, Terahertz channel propagation phenomena, measurement techniques and modeling for 6G wireless communication applications: A survey, open challenges and future research directions, IEEE Commun. Surv. Tutorials, 24(4), 1957–1996, 2022. https://doi.org/10.1109/COMST. 2022.3205505.

[6] F. Launay, NG-RAN and 5G-NR: 5G radio access network and radio interface. in Networks and telecommunications series. London Hoboken: ISTE Ltd, 2021.

[7] W. Jiang and F.-L. Luo, 6G key technologies: a comprehensive guide. Hoboken, New Jersey: IEEE Press, Wiley, 2023.

[8] A. Alalewi, I. Dayoub, and S. Cherkaoui, On 5G-V2X use cases and enabling technologies: A comprehensive survey, IEEE Access, 9, 107710–107737, 2021. https://doi.org/10.1109/ACCESS. 2021.3100472.

[9] C. Chen, X. Chen, D. Das, D. Akhmetov, and C. Cordeiro, Overview and performance evaluation of Wi-Fi 7, IEEE Comm. Stand. Mag., 6(2), 12–18, Jun. 2022. https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.0001.210 0082.

[10] E. Reshef and C. Cordeiro, Future directions for Wi-Fi 8 and beyond, IEEE Commun. Mag., 60(10), 50–55, Oct. 2022. https://doi.org/10.1109/MCOM.003. 2200 037.

[11] K. Mao et al., A UAV-aided real-time channel sounder for highly dynamic nonstationary A2G scenarios, IEEE Trans. Instrum. Meas., 72, 1–15, 2023. https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3301592.

[12] Y. Lyu, W. Wang, Y. Sun, and I. Rashdan, Measurement-based fading characteristics analysis and modeling of UAV to vehicles channel, Vehicular Communications, 45, 100707, Feb. 2024. https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2023.100707.

[13] A. S. Gvozdarev, Closed-form performance analysis of the inverse power lomax fading channel model, Mathematics, 12(19), 3103, Oct. 2024. https://doi.org/10.3390/math12193103.

[14] G. Fraidenraich and M. Yacoub, The α-η-μ and α-κ-μ fading distributions, In 2006 IEEE Ninth International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, pp. 16–20, Manaus-Amazon, Brazil, Aug. 2006. https://doi.org/10.1109/ISSSTA.2006.311725.

[15] M. D. Yacoub, The κ-μ distribution and the η-μ distribution, IEEE Antennas Propag. Mag., 49(1), 68–81, Feb. 2007. https://doi.org/10.1109/MAP. 2007. 370983.

[16] M. D. Yacoub, The α-μ distribution: A physical fading model for the stacy distribution, IEEE Trans. Veh. Technol., 56(1), 27–34, Jan. 2007. https://doi.org/10.1109/TVT.2006.883753.

[17] G. S. Rabelo and M. D. Yacoub, The κ-μ extreme distribution, IEEE Trans. Commun., 59(10), 2776–2785, Oct. 2011. https://doi.org/10.1109/TCOMM.2011.081211.090747.

[18] J. F. Paris, Statistical characterization of κ−μ shadowed fading, IEEE Trans. Veh. Technol., 63(2), 518–526, Feb. 2014. https://doi.org/10.1109/TVT. 2013.2281213.

[19] M. D. Yacoub, The α - η - κ - μ fading model, IEEE Trans. Antennas Propagat., 64(8), 3597–3610, Aug. 2016. https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2570235.

[20] I. Sánchez and F. J. López-Martínez, The Lomax distribution for wireless channel modeling: Theory and applications, IEEE Open J. Veh. Technol., 5, 162–171, 2024. https://doi.org/10.1109/OJVT.2023. 33420 74.

[21] O. S. Badarneh and D. B. D. Costa, Fluctuating Nakagami-m fading distribution, IEEE Wireless Commun. Lett., 13(4), 959–963, Apr. 2024, https://doi.org/10.1109/LWC.2024.3353620.

[22] D. Wu and R. Negi, Effective capacity: A wireless link model for support of quality of service, IEEE Trans. Wireless Commun., 24(5), 630–643, May 2003. https://doi.org/10.1109/TWC.2003.814353.

[23] H. Al-Hmood and H. S. Al-Raweshidy, Unified approaches based effective capacity analysis over composite α–η–μ/gamma fading channels, Electronics Letters, 54(13), 852–853, Jun. 2018. https://doi.org/10.1049/el.2018.1006.

[24] Z. Ji, Y. Z. Wang, and J. H. Lu, MGF-based effective capacity for generalized fading channels, AMM, 929–933, Feb. 2014. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.519-520.929.

[25] J. Zhang, L. Dai, W. H. Gerstacker, and Z. Wang, Effective capacity of communication systems over κ – μ shadowed fading channels, Electronics Letters, 51(19), 1540–1542, Sep. 2015. https://doi.org/ 10.1049/el.2015.1032.

[26] M. You, X. Mou, and H. Sun, Effective capacity analysis of smart grid communication networks, in 2015 IEEE 20th International Workshop on Computer Aided Modelling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD), pp. 196–200, Guildford, United Kingdom, Sep. 2015. https://doi.org/10.1109/CA MAD.2015.7390508.

[27] F. S. Almehmadi and O. S. Badarneh, On the effective capacity of Fisher–Snedecor F fading channels, Electronics Letters, 54(18), 1068–1070, Sep. 2018. https://doi.org/10.1049/el.2018.5479.

[28] J. Zhang, L. Dai, Z. Wang, D. W. K. Ng, and W. H. Gerstacker, Effective rate analysis of MISO systems over α-μ fading channels, in 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), pp. 1-6, San Diego, CA, Dec. 2015. https://doi.org/ 10.1109/GLOCOM.2015.7417005.

[29] J. Zhang, Z. Tan, H. Wang, Q. Huang, and L. Hanzo, The effective throughput of MISO systems over κ –μ fading channels, IEEE Trans. Veh. Technol., 63(2), 943–947, Feb. 2014. https://doi.org/10.1109/TVT.2013.2277992.

[30] M. Bilim, Effective throughput of alternate rician shadowed fading links, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 15(6), 928–930, 2020. https://doi.org/10.1002/tee.23135.

[31] A. P. Prudnikov, J. A. Bryčkov, and O. I. Maričev, Integrals and series. 3: More special functions, Moscow, Russia: Science, 1983.

[32] I. S. Gradštejn, J. M. Ryžik, A. Jeffrey, D. Zwillinger, and I. S. Gradštejn, Table of integrals, series and products, 7. ed., [3. Nachdr.]. Amsterdam: Elsevier Acad. Press, 2009.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 943-956

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Tesisat boşluklu çelik kirişlerin çeşitli yöntemlerle güçlendirilmesinin yapısal performans üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi

Evaluation of the effects of strengthening steel beams with service hole by various methods on structural performance

Emin Battal[1], Mehmet Fethi Ertenli[2*], Şenol Gürsoy[3]

[1] *Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD, 78050, Karabük Türkiye*
[2,3] *Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 78050, Karabük Türkiye*

Öz

Çelik yapılarda, kiriş gövdelerine büyük boşluklar açılması, özellikle tesisat geçişleri nedeniyle gerekli olabilmektedir. Ancak, bu tür boşluklar kirişlerin kesme ve moment taşıma kapasitesini önemli ölçüde azaltarak yapısal performansı olumsuz etkileyebilir. Literatürde gövde boşluklarının etkileri geniş çapta incelenmiş olsa da bu etkileri azaltmaya yönelik sistematik ve kapsamlı yaklaşımlar sınırlıdır.

Bu çalışmada, gövdesinde 400x700 mm boyutunda tesisat boşluğu açılmış IPE600 enkesitli 8 m uzunluğunda bir çelik kirişin yapısal performans kayıplarını en aza indirmek için farklı güçlendirme stratejilerinin etkinliği araştırılmıştır. Eurocode 3'e uygun şekilde modellenen basit mesnetli kiriş üzerinde lineer burkulma ve doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, göçme yükleri, moment kapasiteleri ve şekil değiştirme parametreleri açısından değerlendirilmiştir. Bu analizler ışığında, referans modelin taşıma kapasitesine en yakın sonuçları sağlayan güçlendirme düzenlemesi belirlenmiştir. Çalışmanın bulguları, gövde boşluklu çelik kirişlerin güçlendirilmesi yoluyla yapısal performansın artırılabileceğini ve bu tür optimum tasarım yaklaşımlarının çelik yapıların tasarım süreçlerinde daha yaygın bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Çelik kirişler, Tesisat boşluğu, Yapısal takviye, Yapısal stabilite, Doğrusal olmayan analiz

Abstract

In steel structures, it may be necessary to provide large openings in the beam webs, especially for plumbing transitions. However, such voids can significantly reduce the shear and moment carrying capacity of the beams and adversely affect the structural performance. Although the effects of web openings have been extensively studied in the literature, systematic and comprehensive approaches to mitigate these effects are limited.

In this study, the effectiveness of different strengthening strategies to minimize the structural performance losses of an 8 m long steel beam with IPE600 cross-section and 400x700 mm plumbing openings in its web is investigated. Linear buckling and nonlinear analyses were performed on the simply supported beam modeled in accordance with Eurocode 3. The results were evaluated in terms of failure loads, moment capacities and deformation parameters. Based on these analyses, the strengthening arrangement that provides the closest results to the bearing capacity of the reference model was determined. The findings of the study indicate that structural performance can be improved by strengthening steel beams with web openings and that such optimal design approaches can be more widely used in the design process of steel structures.

Keywords: Steel beams, Plumbing opening, Structural strengthening, Structural stability, Nonlinear analysis

1 Giriş

Çelik yapıların tasarım ve kullanım süreçlerinde, özellikle mimari ve mekanik gereksinimlerden kaynaklanan yapısal düzenlemeler, kiriş gövdelerinde büyük boşlukların açılmasını gerekli kılabilmektedir. Uygulamada, mimari kaygılar ile mekanik tesisat kanalları ve benzeri elemanların kirişlerin altından geçirilmesi durumunun net kat yüksekliğini azaltması nedeniyle kiriş gövdesinde boşluk açılması talebi oluşmaktadır. Kirişte açılan gövde boşlukları, net kat yüksekliğini korumak amacıyla, pratik bir çözüm olarak değerlendirilse de bu uygulama kirişlerin yük taşıma ve şekil değiştirme kapasitelerinde önemli azalmalara yol açmaktadır. Özellikle mevcut yapılarda sonradan yapılan kullanım amacı değişiklikleri gibi öngörülmeyen durumlar, tasarım aşamasında dikkate alınmayan yapısal kusurların ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

Maali ve Çınar [1] yaptıkları çalışmada gövde boşluklarının bulunduğu bölgelerde kesitin iç kuvvetlerine yalnızca boşluğun üst ve altındaki "T" enkesitleri karşı koyduğunu belirtmiştir. Bu bölgede kesme kuvvetlerinin etkisiyle "T" kesitlerin köşelerinde ek momentler oluşmakta ve bu momentler, mevcut momente eklenerek boşluk köşelerinde plastik mafsalların oluşumuna yol açtığını ifade etmiştir. Rodrigues vd. [2] özellikle kompakt kesitli, dikdörtgen gövde boşluklu kirişlerde, boşluk yüksekliği kiriş yüksekliğinin %50'sini aştığında, göçme mekanizması genellikle boşluk çevresinde oluşan plastik mafsallardan

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: m.fethiertenli@karabuk.edu.tr (M. F. Ertenli)
Geliş / Received: 22.02.2025 Kabul / Accepted: 12.05.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1645103

kaynaklanan Vierendeel mekanizması ile meydana geldiğini ifade etmiştir.

Literatürde, çelik kirişlerin gövdelerinde açılan farklı şekil ve boyutlardaki boşlukların yapısal performansa etkilerini inceleyen çeşitli deneysel ve sayısal çalışmalar bulunmaktadır. Ancak, bu çalışmaların büyük çoğunluğu, boşlukların olumsuz etkilerini tespit etmekle sınırlı kalmış ve bu etkileri azaltmaya yönelik kapsamlı bir yaklaşım geliştirilmemiştir. Mevcut çalışmalarda, gövde boşluklarının olumsuz etkilerinin azaltılması amacıyla yalnızca sınırlı sayıda düzenleme (örneğin, çevresel rijitlik levhalarının eklenmesi) incelenmiştir. Bu nedenle, çelik kirişlerde açılan gövde boşluklarının neden olduğu performans kayıplarını azaltmaya yönelik daha etkili ve çeşitli güçlendirme düzenlemelerinin araştırılması büyük önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, çelik kirişlerde gövde boşluklarının yapısal performansa etkileri detaylı bir şekilde incelenmiş ve bu etkileri en aza indirmeye yönelik farklı güçlendirme düzenlemelerinin etkinliği değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, IPE600 kesitli, 8 m uzunluğunda, basit mesnetli ve düzgün yayılı yük etkisindeki bir çelik kiriş referans model olarak ele alınmıştır. Referans kirişe dikdörtgen bir gövde boşluğu eklenerek bu boşluğun yapısal performansa olumsuz etkileri analiz edilmiştir. Daha sonra, boşluk çevresine uygulanan farklı güçlendirme düzenlemeleri ile bu olumsuz etkilerin azaltılma düzeyleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilerek sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

Literatürde deneysel ve sayısal olarak gerçekleştirilen çalışmaların büyük bir kısmı, gövde boşluklarının kirişlerin taşıma kapasitesi, rijitlik ve stabilite üzerindeki etkilerini belirlemeye odaklanmış, ancak bu etkileri minimize etmeye yönelik kapsamlı bir yaklaşım geliştirmemiştir. Gövde boşluklarının neden olduğu olumsuzlukların giderilmesi amacıyla yapılan çalışmaların kapsamı ise genellikle sınırlı kalmış ve çoğunlukla çevresel, yatay ve düşey rijitlik levhalarının eklenmesi gibi belirli takviye yöntemleriyle sınırlandırılmıştır. Bununla birlikte, literatürde doğrudan bu olumsuzlukları gidermeye yönelik daha sistematik ve geniş kapsamlı bir araştırmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmada, gövde boşluklu çelik kirişlerin yapısal performansını artırmaya yönelik güçlendirme tekniklerini ele alan önceki araştırmalar incelenmiş ve mevcut literatürdeki bulgular ışığında çalışma kapsamında izlenen metodoloji oluşturulmuştur. Bu bağlamda, literatürde yer alan belirli çalışmalar değerlendirilmiş ve ilgili bulgular, bu araştırmanın kapsamını genişletmek ve önerilen güçlendirme stratejilerinin etkinliğini tartışmak amacıyla kaynak olarak kullanılmıştır. Aşağıda, konu ile doğrudan ve dolaylı ilişkili bazı çalışmalar özetlenmektedir.

Rodrigues vd., [2] çalışmasında, gövde boşluklu çelik kirişlerin dış yükler altındaki yapısal davranışlarını incelemek amacıyla ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak kapsamlı analizler gerçekleştirmiştir. Araştırmada, farklı gövde boşluk geometrileri, boyutları ve konumlarının kiriş açıklıkları üzerindeki etkileri değerlendirilmiş ve toplamda iki farklı kiriş yüksekliği için 52 model oluşturulmuştur. Her model için göçme yükü, yer değiştirme, moment kapasitesi ve göçme modu açısından kapsamlı bir karşılaştırma yapılmıştır. Çalışma kapsamında, eğilme momenti-yer değiştirme ilişkisi üç farklı boşluk geometrisi için incelenmiş; dairesel ve kare boşlukların eğilme momenti taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir değişiklik yaratmadığı, dikdörtgen boşlukların ise taşıma kapasitesinde yaklaşık %30 oranında azalmaya neden olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, boşluk yüksekliğinin kiriş yüksekliğinin yarısından fazla olması durumunda da göçme mekanizmasının Vierendeel göçme mekanizmasına dönüştüğü belirlenmiştir. Bununla birlikte, araştırmacılar boşluk çevresine yatay rijitlik levhaları ekleyerek bunun yapısal performans üzerindeki etkisini incelemiş ve güçlendirilmiş kirişlerin taşıma kapasitesinin önemli ölçüde arttığını belirtmiştir. Sonuç olarak rijitlik levhaları ile güçlendirilmiş kirişlerde göçme yükünün, güçlendirme yapılmayan kirişlere kıyasla 2~3 kat artırılabileceği belirlenmiştir.

Mata vd., [3] çalışmasında, çelik kirişlerin gövdelerinde açılan boşlukların yapısal performans üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Çalışmada, boşlukların şekli, boyutu, konumu ve aralarındaki mesafe parametreleri dikkate alınarak ANSYS yazılımı kullanımıyla sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, boşlukların yaklaşık olarak açıklığın %15'i konumunda (yaklaşık 0.15L) yerleştirilmesi durumunda kirişte daha yüksek Von Mises gerilme yığılmaları ve diğer konumlara kıyasla daha fazla sehim oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca, dairesel boşlukların gerilme dağılımını daha homojen sağladığı, kare boşlukların göreli olarak daha az olumsuz etki oluşturduğu, ancak büyük boyutlu dikdörtgen boşlukların kirişin yük taşıma kapasitesini belirgin biçimde azalttığı ifade edilmiştir. Yazarlar, gövde boşluklarının mesnet bölgelerine yakın konumlandırılması halinde hem gerilme hem de deformasyonların daha yüksek değerlere ulaştığını vurgulamış; özellikle dikdörtgen boşlukların, diğer geometrik türlere kıyasla gerilme yığılması ve sehim artışını daha fazla tetikleyerek yapısal performansı olumsuz etkilediği sonucuna ulaşmışlardır.

Abdel-Ghaffar vd. [4] çalışmasında, dairesel gövde boşluklarının çevresine uygulanan beş farklı güçlendirme düzenlemesinin göçme yüküne etkisini araştırmıştır. Çalışmada ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak, geometrik ve malzeme bakımından doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçları önceki deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır. Araştırmacılar, beş farklı güçlendirme stratejisini iki farklı yükleme senaryosu altında karşılaştırmıştır. Elde edilen bulgular hem yatay hem de düşey rijitlik levhaları ile güçlendirilmiş kirişlerin göçme yükünü %15 oranında artırdığını göstermiştir. Çalışmada ayrıca, kiriş uzunluğu boyunca boşluğun konumunun taşıma kapasitesine etkisi incelenmiştir. Noktasal yük etkisindeki kirişlerle karşılaştırıldığında, düzgün yayılı yük etkisindeki kirişlerin daha yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum, düzgün yayılı yükleme altındaki kirişlerde kesme kuvvetinin doğrusal değişim göstermesi nedeniyle Vierendeel göçme mekanizmasının engellendiği şeklinde açıklanmıştır.

Doğan [5] tarafından yapılan tez çalışmasında, petek kirişlerin optimum boyutlandırılması, yük altındaki taşıma kapasiteleri ve farklı güçlendirme yöntemlerinin yapısal

performansa etkileri incelenmiştir. Çalışma kapsamında, ABAQUS yazılımı kullanılarak harmoni arama ve parçacık sürü algoritmaları yardımıyla optimizasyon yapılmış, ardından deneysel analizler gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, farklı güçlendirme stratejileri (yatay, düşey ve dairesel rijitlik levhaları) kullanılarak, kirişlerin nihai yük taşıma kapasitesi değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre: Deneyde kullanılan IPN200 kesitli kirişler için; yatay rijitlik levhaları ile %7.49, dairesel rijitlik levhaları ile %17.17, düşey rijitlik levhaları ile %19.63 oranında kapasite artışı sağlandığı görülmüştür. Başka bir kesit türü (IPN240) için de deneysel çalışmalar yapan araştırmacı bu kesit için; yatay rijitlik levhaları ile %14.12, dairesel rijitlik levhaları ile %18.78, düşey rijitlik levhaları ile %22.35 oranında kapasite artışı sağlandığını göstermiştir. Çalışmadan elde edilen bulgulara göre; boşluklar arasına düşey rijitlik levhaları yerleştirilmesinin, diğer takviye yöntemlerine kıyasla en yüksek taşıma kapasitesi artışını sağladığı ortaya koyulmuştur. Bu bağlamda boşluk çevresi takviye edilmiş kirişlerin pratik uygulamalarda kullanılabileceği belirtilmiştir.

Al-Rifaie vd. [6] çalışmasında, dikdörtgen gövde boşluklu çelik I-kirişlerinin eğilme etkisindeki yapısal davranışını incelemiştir. Çalışma kapsamında, gövde boşluklarının toplam alanı, yükseklikleri, sayısı ve farklı yükleme hızları (2.214, 5 ve 7 m/s) dikkate alınarak ABAQUS yazılımı ile doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları, yükleme hızının 2.214 m/s'den 7 m/s'ye çıkarılmasıyla, göçme yükünün %152, yer değiştirmenin %357 ve moment taşıma kapasitesinin %38 oranında arttığını ortaya koymuştur. Ayrıca, kiriş gövdelerinde düzenli aralıklarla açılan küçük boşlukların sayısının artırılmasının, nihai göçme yükü üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir seviyede olduğu belirlenmiştir. Ancak, boşluk sayısını azaltıp boyutlarını büyütmenin, toplam boşluk oranı sabit tutulsa dahi, kirişin eğilme momenti taşıma kapasitesini önemli ölçüde azalttığını tespit etmiştir. Bununla birlikte, özellikle geniş gövde boşluklarına sahip kirişlerde, yatay çelik takviye levhaları ile güçlendirme yapılmasının yapısal performansı önemli ölçüde iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Yatay takviye levhalarıyla güçlendirilmiş kirişlerin, takviye levhası bulunmayan kirişlere kıyasla %20 daha yüksek eğilme momenti taşıma kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, boşluklu çelik kirişlerin taşıma kapasitesinin artırılmasında takviye levhalarının etkin bir mühendislik çözümü sunduğunu göstermektedir (Al-Rifaie vd., 2021).

Ertenli ve arkadaşları [7] tarafından yapılan çalışmada, düzenli dairesel boşluklara sahip çelik kirişlerde yanal burulmalı burkulma (YBB) davranışı incelenmiştir. Çalışmada geleneksel YBB denklemlerinin, gövde açıklıklarından kaynaklanan lokal buruşmaları göz ardı ettiği ve bu nedenle burkulma momentlerini olduğundan daha düşük tahmin ettiği belirtilmiştir. Bu bağlamda gövde açıklıklarının burulma ve burkulma rijitliklerine etkileri analitik olarak modellenmiş ve geliştirilen yöntemlerin doğruluğunu test etmek amacıyla 114 farklı sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları, AISC 360-16 ve AS4100:2020 kodlarının elastik sınırlar içinde söz konusu kirişler için burkulma yüklerini olduğundan yüksek tahmin ettiğini, buna karşın Eurocode 3'ün daha güvenli tahminler sunduğunu göstermiştir. Yapılan çalışma, dairesel kirişlerin YBB davranışını daha doğru tahmin edebilmek için mevcut tasarım formüllerinin revize edilmesi gerektiğini ortaya koymuştur.

Abbas [8] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çelik I kesitli kirişlerin gövdelerine düzenli aralıklarla açılan boşlukların taşıma kapasitesine etkileri deneysel ve sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Bu kapsamda, araştırmacı kiriş kesitini sabit tutarak, farklı boşluk geometrilerine (dairesel, dikdörtgen ve altıgen) ve iki farklı boşluk oranına sahip toplam altı farklı kiriş modeli oluşturmuştur. Çalışmada, oluşturulan kiriş modelleri deneysel olarak test edilmiş ve elde edilen sonuçların doğrulanması amacıyla ABAQUS programı kullanılarak üç boyutlu doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, gövde boşluğu oranının 1.71'den 2.5'e artırılması, nihai göçme yükünde %3.72 oranında bir azalmaya neden olmuştur. Bununla birlikte, dairesel boşluklu kirişlerin altıgen boşluklu kirişlere, altıgen boşluklu kirişlerin ise dikdörtgen boşluklu kirişlere kıyasla daha iyi bir yapısal performans sergilediği belirlenmiştir. Aynı boşluk oranına sahip kirişler arasında yapılan karşılaştırmada, dairesel boşluklu kirişlerin, dikdörtgen boşluklu kirişlere göre %12.39 daha yüksek göçme yüküne sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, çalışmada deneysel olarak test edilen ve ABAQUS modeli ile doğrulanan dairesel boşluklu kirişlerin, eşkenar dörtgen, sekizgen, yamuk, yatay ve dikey elips geometrili gövde boşluklarına sahip kirişlere kıyasla daha yüksek göçme yüküne sahip olduğu ve genel olarak daha iyi bir yapısal performans sergilediği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, boşluk geometrisinin çelik kirişlerin taşıma kapasitesini doğrudan etkilediğini ve dairesel boşluklu kirişlerin daha avantajlı bir yapısal davranış sunduğunu ortaya koymaktadır.

Ertenli ve arkadaşları [9] yaptıkları çalışmada kiriş gövde kesiti narinliğinin gövdede buruşmalara neden olduğunu ve bunun elemanın yanal buruşmalı burkulma modu ile göçmesine neden olduğunu belirtmiştir. Yaptıkları sonlu elemanlar analizlerinde, yönetmelik tahminlerinden daha yüksek burkulma sınır uzunluğu değerleri elde edilmiş ve bu durumun yönetmeliklerin gövde buruşmalarını dikkate almamasından kaynaklandığı belirlenmiştir. Çalışmanın bulgularına göre gövde narinliği arttıkça inelastik burkulma sınır uzunluğunun da yükseldiği sonucuna ulaşılmıştır.

Aydın ve arkadaşları [10], ince cidarlı sinüzoidal gövdeli çelik I-kesitli kirişlerin kolonlara bağlantılarındaki düzlem içi davranışını deneysel ve analitik yöntemlerle incelemiştir. Çalışmada tam ölçekli dört adet kiriş-kolon bağlantısının, çevrimsel yükleme altında test edilerek panel bölgesinin davranışı analiz edilmiştir. Ardından ABAQUS sonlu elemanlar modeli ile analizler gerçekleştirilmiş ve sonuçların deneysel verilerle oldukça uyumlu olduğu gösterilmiştir. Çalışma, düz panel bölgeli bağlantıların, dalgalı panel bölgeli bağlantılara göre daha yüksek stabilite sağladığını ortaya koymuştur.

Chung ve arkadaşları [11], dairesel gövde boşluklarına sahip çelik kirişlerde Vierendeel mekanizmasını deneysel ve analitik yöntemlerle incelemiştir. Çalışmada, düşük moment bölgesinde plastik mafsalların oluşmasının her zaman kesit taşıma kapasitesini sınırlandırmadığı ve kirişlerin dört plastik mafsal gelişene kadar ek yük taşıyabildiği belirtilmiştir. Sonlu eleman analizleri, mevcut tasarım yöntemlerinin eksikliklerini ortaya koymuş ve dairesel açıklıklara sahip çelik kirişler için ampirik bir moment-kesme etkileşim eğrisi önerilmiştir. Çalışma, plastik mafsal oluşumunun yük kapasitesine olan etkilerini vurgulamaktadır.

Chung ve arkadaşları [12] tarafından yapılan başka bir çalışmada, farklı şekil ve boyutlardaki büyük gövde boşluklarına sahip çelik kirişlerin taşıma kapasitesini incelemiştir. Çalışma, Vierendeel mekanizmasının kritik bir faktör olduğunu ve açıklık derinliğinin hem kesme hem de eğilme kapasitesini belirlediğini göstermektedir. Sonlu eleman analizleriyle elde edilen veriler kullanılarak, farklı açıklık türlerine sahip çelik kirişler için genelleştirilmiş bir moment-kesme etkileşim eğrisi geliştirilmiştir. Önerilen ampirik tasarım yöntemi, gövde boşluklu kirişlerin taşıma kapasitesini daha doğru tahmin etmek için küresel kesme kapasitesi konseptini içermektedir.

Tsavdaridis ve D'Mello [13], farklı şekillerdeki gövde boşluklarına sahip çelik kirişlerin gövde burkulma davranışını deneysel ve sonlu eleman yöntemi ile analiz etmiştir. Çalışma, geleneksel dairesel ve altıgen açıklıklara ek olarak farklı açıklık şekillerinin de incelenmesini içermektedir. Bulgular, açıklık geometrisinin ve açıklıklar arasındaki mesafenin, gövde kesiti burkulmasını ve kesme dayanımını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Ayrıca, yeni tasarlanan açıklık şekillerinin geleneksel dairesel açıklıklara kıyasla daha iyi yapısal performans sunduğu belirlenmiştir.

Abidin ve Izzuddin [14], düzensiz gövde boşluklarına sahip çelik kirişlerin yerel burkulma analizini ele almıştır. Çalışmada, düzensiz açıklıkların kesit stabilitesi üzerindeki etkisini incelemek için Eleman Serbest Galerkin (Element Free Galerkin - EFG) yöntemi ve Döner Yay Analojisi (Rotational Spring Analogy - RSA) kullanılmıştır. Önerilen yaklaşımın geleneksel sonlu eleman analizlerine kıyasla daha hızlı ve hesaplama açısından verimli olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar, düzensiz açıklıklara sahip kirişlerin burkulma dayanımını doğru bir şekilde değerlendirmek için mevcut tasarım yöntemlerinin iyileştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

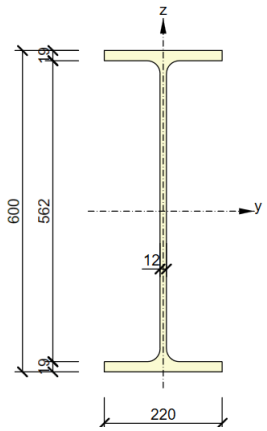
Maali ve Çınar [1] tarafından yapılan çalışma, çevrimsel yüke maruz kalan gövde açıklıklı kirişlerin yük taşıma ve yer değiştirme kapasitelerini artırmayı, rijitlik kayıplarını azaltmayı ve BS5950 standardına uygun yüksek mukavemetli kirişler tasarlamayı amaçlamaktadır. Deneysel ve sayısal analizler sonucunda, gövde yüksekliği ile açıklık çapı oranı 1.618 (Altın Oran) olan kirişlerin taşıma kapasitesi, enerji sönümleme kapasitesi ve moment dayanımı açısından daha üstün performans sergilediği belirlenmiştir. Altın Oran ile optimize edilen kirişlerin, ideal modele en yakın mekanik davranışı sergilediği ve rijitlik kayıplarını minimize ettiği ortaya konmuştur.

2 Materyal ve metot

Bu çalışmada, çelik kirişlerin gövdesinde tesisat geçirilmesi amacıyla açılan boşlukların yapısal performansa etkileri ve bu etkilerin farklı güçlendirme düzenlemeleriyle minimize edilme potansiyeli incelenmiştir. Çalışma, referans kiriş modellemesi, gövde boşluğu bulunan kiriş modellemesi ve güçlendirme düzenlemelerinin bulunduğu modellerin analiz edilmesi olmak üzere üç ana aşamada gerçekleştirilmiştir.

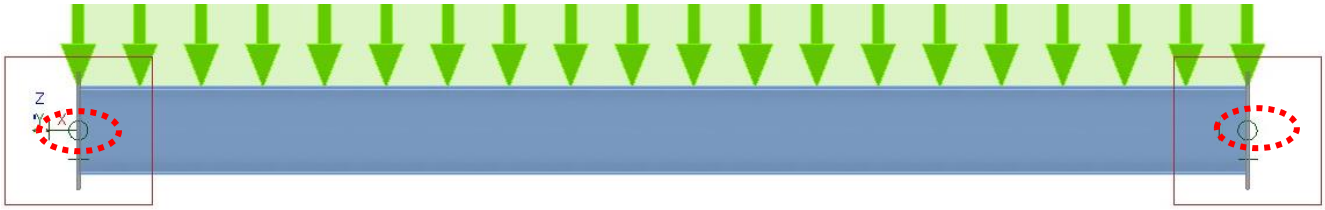
2.1 Malzeme ve geometri özellikleri

Analizlerde, IPE600 kesitli, 8 m uzunluğunda, sabit mesnetli ve düzgün yayılı yük etkisindeki bir çelik kiriş modeli kullanılmıştır (Şekil 1). Çelik malzemenin mekanik özellikleri; elastisite modülü (E) 200 GPa, Poisson oranı (υ) 0.3 ve akma dayanımı (F_y) 355 MPa olacak şekilde tanımlanmıştır. Referans model, gövde boşluğu içermeyen dolu gövdeli bir kiriş olarak tasarlanmış ve analiz edilmiştir (Şekil 2). Kiriş, her iki ucu sabit mesnetli olacak şekilde modellenmiştir. Bu kapsamda, mesnet bölgelerinde x, y ve z yönlerindeki yer değiştirmeler sınırlandırılmış; eğilme düzlemindeki dönme ise serbest bırakılmıştır. Ancak, sistemin genel stabilitesini sağlamak amacıyla yanal burkulma ve burulma eksenlerindeki dönme serbestlikleri mesnetlerde sınırlandırılmıştır. Diğer bir ifade ile kullanılan programın (IDEA StatiCa [15]) sağladığı olanaklar doğrultusunda, mesnetlerde yatay doğrultudaki hareketler kısıtlanmış, ancak güçlü eksen etrafındaki dönme hareketlerine izin verilmiştir. Bunun yanı sıra, kesme etkili birleşim olarak modellenen bu bağlantılar, kirişin göçme mekanizmasını etkilemeyecek şekilde düzenlenmiştir. Söz konusu düzenlemeler ile birleşimlerin kirişin genel stabilitesine olumsuz bir etkide bulunmaksızın, yapısal davranışın gerçekçi bir şekilde temsil edilmesi sağlamıştır.



Şekil 1. Analizlerde dikkate alınan IPE600 profili (ölçüler mm olarak verilmiştir)

Kiriş üzerine uygulanan yükleme, düzgün yayılı yük olarak tanımlanmış ve analizler statik olarak artan yükleme esasına dayalı iteratif bir yaklaşımla gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, her bir kiriş modeli için belirli bir servis yükü tanımlanmak yerine, kademeli yük artışı ile taşıma kapasitesinin ötesine geçilerek yapısal tepkilerin gözlemlenmesi amaçlanmıştır.



Şekil 2. Referans kiriş modeli

Şekil 3. Gövdesinde boşluk bulunan IPE600 kesitli kirişin yandan görünüşü (Model 1)

Gerçekleştirilen analizler sonucunda, her modelin taşıyabildiği maksimum düzgün yayılı yük değerleri belirlenmiş ve bu değerler esas alınarak modeller arasında karşılaştırmalı değerlendirmeler yapılmıştır.

2.2 Boşluğun geometrisi ve konumu

Kirişin gövdesinde oluşturulan boşluk, Vierendeel göçme mekanizmasını tetikleyebilecek şekilde tasarlanmıştır. Vierendeel göçme mekanizması, gövdesinde büyük açıklıklar bulunan kirişlerde, açıklık köşelerinde plastik mafsalların oluşması sonucu meydana gelen bir göçme türüdür. Kesme kuvvetlerinin etkisiyle boşluk çevresinde ilave momentler oluşmakta ve bu momentler, kirişin taşıma kapasitesini önemli ölçüde azaltmaktadır.

Bu çalışmada, gövdesinde boşluk açılmış çelik kirişlerde sıklıkla karşılaşılan Vierendeel (ikincil eğilme) göçme mekanizmasının yapısal davranış üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, boşluk geometrisi ve konumu dikkatli bir şekilde belirlenmiştir. Boşluk, kirişin net açıklığının %15–20'si (0.15L–0.20L) aralığında ve gövde yüksekliğinin yaklaşık %71'i oranında olacak şekilde konumlandırılmıştır (Şekil 3). Boşluk boyutları, uygulamada tesisat borularının geçişi için yaygın olarak tercih edilen geometrik oranlar dikkate alınarak 400x700 mm olarak belirlenmiştir. Bu tasarım yaklaşımı, yapısal sistemin Vierendeel mekanizması etkisiyle ortaya çıkabilecek ikincil eğilme momentlerini barındıran temsili bir durumu yansıtmakta ve uygulamada karşılaşılan yaygın mühendislik çözümleriyle uyumlu bir modelleme ortamı sağlamaktadır. Böylece, boşluk çevresinde gelişen ikincil moment etkilerinin kirişin taşıma kapasitesi, rijitliği ve stabilitesi üzerindeki olumsuz etkileri detaylı biçimde analiz edilerek, bu tür göçme mekanizmalarının yapısal performans üzerindeki etkileri ve tasarım açısından ortaya koyduğu sınırlamalar sistematik biçimde değerlendirilmiştir.

2.3 Boşluk çevresinin takviyesi ve alternatif güçlendirme yöntemleri

Çelik kirişlerin gövdesinde açılan boşluklar, elemanların yapısal performansını olumsuz etkileyerek kesme rijitliğinin azalmasına, yerel gerilme yoğunluklarının artmasına ve nihayetinde taşıma kapasitesinde belirgin düşüşlere neden olmaktadır. Bu olumsuzlukları gidermek ve kirişin bütüncül stabilitesini korumak amacıyla, boşluk çevresinde çeşitli güçlendirme stratejileri uygulanmaktadır. Literatürde, bu tür boşlukların neden olduğu kapasite kayıplarını telafi etmek amacıyla çevresel rijitlik levhaları, yatay ve düşey destek elemanları gibi farklı takviye yöntemleri önerilmektedir. Bu çalışmada, gövde boşluğu çevresinde uygulanan dokuz farklı güçlendirme tekniğinin etkinliği incelenmiş ve yapısal performansa olan katkıları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada güçlendirme elemanı olarak kullanılan plakaların boyutlarına ilişkin bilgiler Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'de yer alan uzunluk değerleri yatay ve/veya düşey doğrultuda uzanan elemanların boylarını ifade etmektedir. Uygulanan alternatif çözümler, boşluk çevresindeki gerilme dağılımını optimize ederek plastik mafsal oluşumunu geciktirmek ve göçme mekanizmasını kontrol altına almak amacıyla tasarlanmıştır. Böylece farklı güçlendirme yöntemlerinin etkinliği sayısal analizler ışığında detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. Güçlendirme elemanları, ana kirişin malzemesiyle aynı malzemeden imal edildiği kabul edilmiş ve kaynakla kirişe entegre edilmiştir. Sonlu elemanlar analizinde, kiriş eleman ile güçlendirme elemanları arasındaki kaynaklı bağlantı "*weld*" komutu kullanılarak yapılmıştır. Bu kapsamda kaynak bağlantısının yapıldığı noktada güçlendirme elemanı ile esas kiriş arası tam yapışık şekilde modellenmiştir. Kullanılan kaynak malzemesinin mekanik özellikleri, ana kirişin malzeme özellikleri ile uyumlu olacak şekilde yine S355 çeliği olarak tanımlanmıştır.

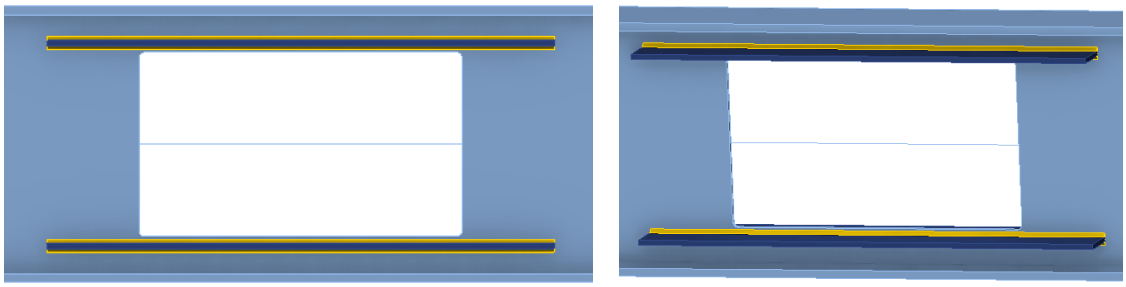
Kaynak dikiş kalınlığı ise ilgili ulusal çelik yapı tasarım yönetmeliğinde izin verilen maksimum değer esas alınarak belirlenmiştir. Bu tercih, birleşim bölgesindeki en zayıf halkayı ortadan kaldırmak ve yapısal göçmenin kaynak bölgesinden kaynaklanmamasını sağlamak amacıyla yapılmıştır.

Çalışma kapsamında düzenlenen güçlendirmeler Şekil 4-12'de verilmektedir.

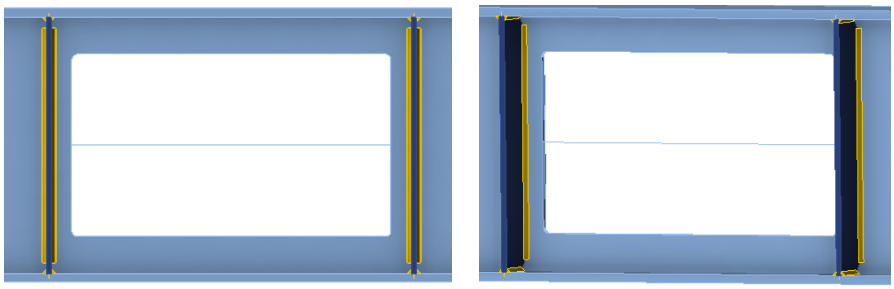
Tablo 1. Güçlendirmede kullanılan elemanların boyutları (mm)

Model	Güçlendirme Düzeni	Kalınlık	Genişlik	Uzunluk	
				Yatayda	Düşeyde
Ref. Model	Gövde boşluksuz	-	-	-	-
Model 1	Gövde boşluklu - güçlendirmesiz	-	-	-	-
Model 2	Çevresel rijitlik levhalı	12	125	688	388
Model 3	Yatay rijitlik levhalı	12	104	1100	-
Model 4	Düşey rijitlik levhalı	12	104	-	562
Model 5	Hem yatay hem de düşey rijitlik levhalı	12	104	1100	562
Model 6	Yatay gövde çiftleme levhalı	12	60	1100	-
Model 7	Hem yatay hem de düşey gövde çiftleme levhalı	12	60	1100	390
Model 8	Yatay olarak "L" profillerle takviyeli	-	L100/63/8	1100	-
Model 9	Yatay olarak "U" profili zayıf	-	UE100	1100	-
Model 10	Yatayda çapraz formda yerleştirilen levhalı	12	110	1100	-

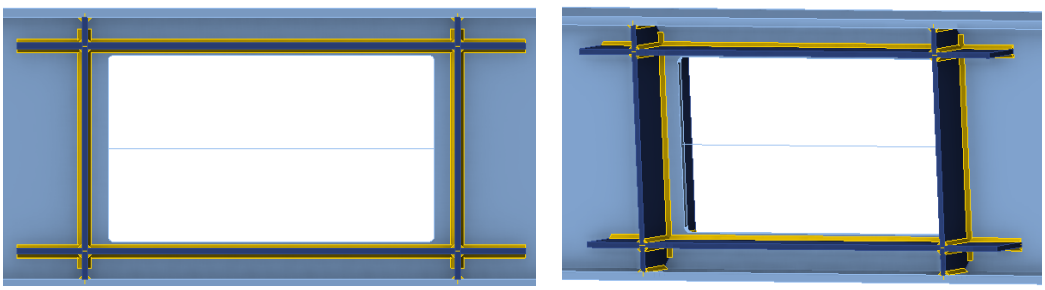
Şekil 4. Tesisat boşluğu çevresel rijitlik levhası kullanılarak takviye edilmiş kiriş (Model 2)



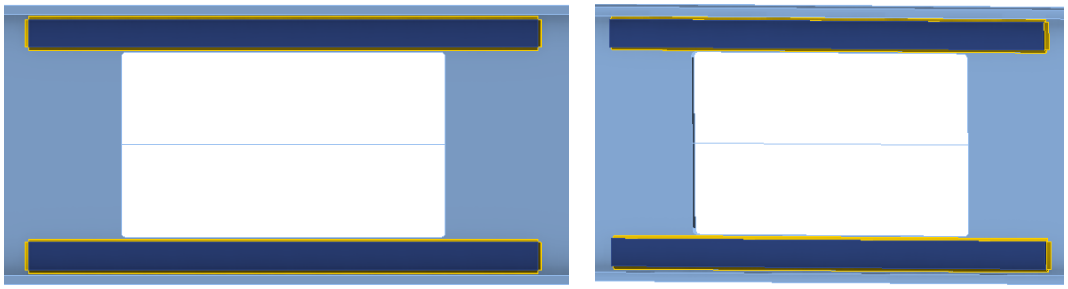
Şekil 5. Tesisat boşluğu yatay rijitlik levhası kullanılarak takviye edilmiş kiriş (Model 3)



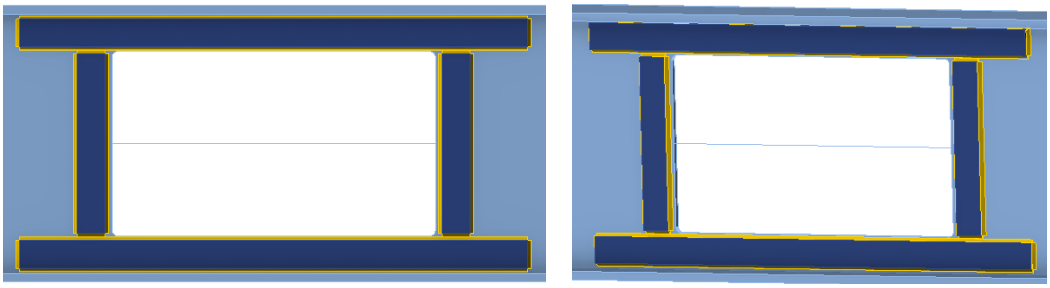
Şekil 6. Tesisat boşluğu düşey rijitlik levhası kullanılarak takviye edilmiş kiriş (Model 4)



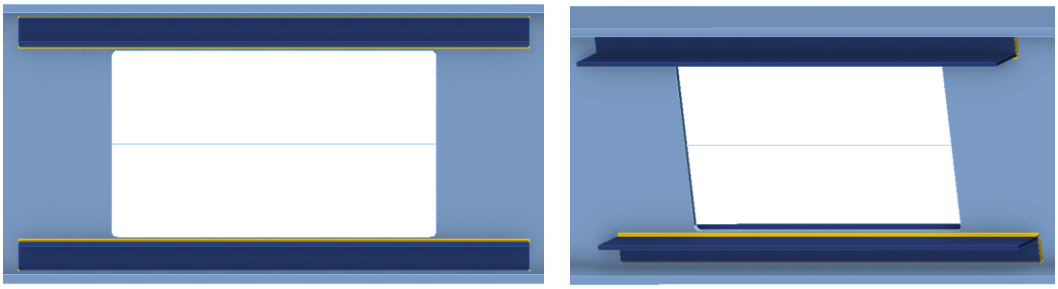
Şekil 7. Tesisat boşluğu yatay ve düşey rijitlik levhalarıyla takviye edilmiş kiriş (Model 5)



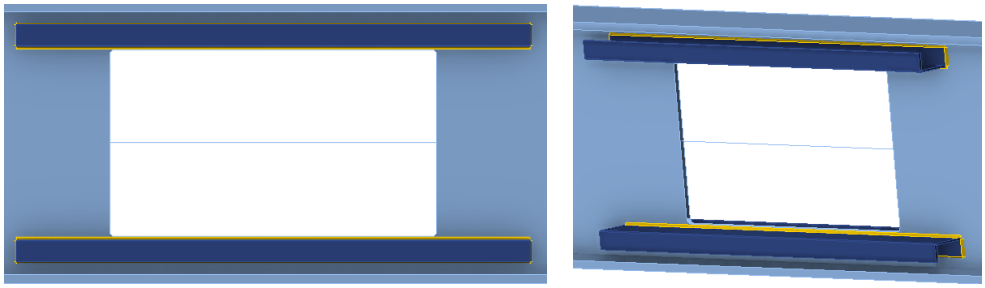
Şekil 8. Tesisat boşluğunun yatay gövde çiftleme levhalı şekilde takviye edilmiş kiriş (Model 6)



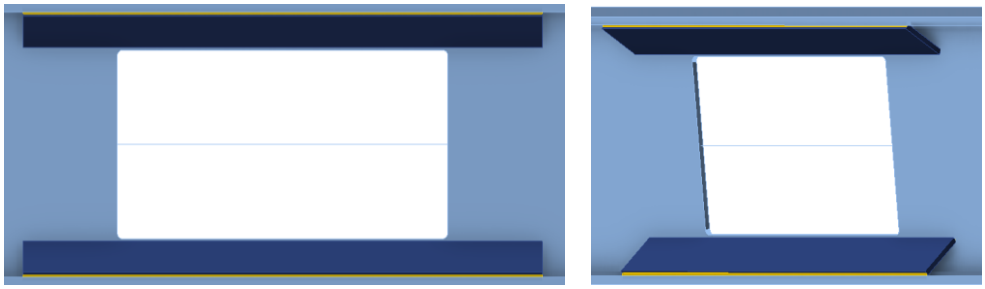
Şekil 9. Tesisat boşluğunun hem yatay hem de düşey gövde çiftleme levhalı şekilde takviye edilmiş kiriş (Model 7)



Şekil 10. Tesisat boşluğunun yatay olarak "L" profillerle takviye edilmiş kiriş (Model 8)



Şekil 11. Tesisat boşluğunun yatay olarak "U" profili zayıf ekseninde kaynaklanarak takviye edilen kiriş (Model 9)



Şekil 12. Tesisat boşluğunun yatayda çapraz formda yerleştirilen levhalarla takviye edilmiş kiriş (Model 10)

Bu çalışmada, farklı gövde boşluğu takviye biçimlerine sahip çelik kiriş modelleri oluşturularak, boşlukların ve uygulanan güçlendirme düzenlemelerinin yapısal performansa etkileri kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda, analizlerde karşılaştırma amacıyla üç temel model kategorisi ele alınmıştır. Bunlar; referans kiriş, takviye uygulanmamış gövde boşluğu bulunan kiriş ve boşluk çevresine çeşitli güçlendirme stratejileri uygulanmış kirişler şeklindedir. Toplamda 11 farklı model oluşturularak, her bir modelin taşıma kapasitesi, göçme davranışı ve yapısal performans üzerindeki etkileri doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri ile incelenmiştir.

2.4 Yapısal çözümlemeler

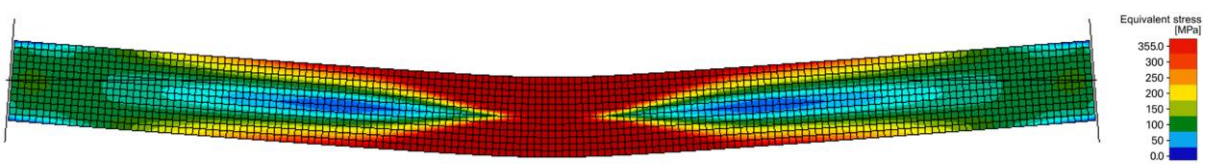
Çalışma kapsamında, çelik kirişlerde gövde boşluklarının yapısal performansa etkilerini incelemek ve bu etkileri en aza indirmeyi amaçlayan güçlendirme stratejilerini değerlendirmek için sonlu elemanlar yöntemini kullanan IDEA StatiCa [15] programı yardımıyla doğrusal ve doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Modelleme sürecinde, gövde boşluklarının neden olduğu yerel gerilme yoğunluklarını (yığılmaları), plastik mafsal oluşumlarını ve taşıma kapasitesindeki değişimleri doğru bir şekilde tespit etmek amacıyla doğrusal olmayan malzeme ve geometrik analizler yapılmıştır. Bunun yanı sıra, boşluğun bulunduğu bölgedeki stabilite kayıplarını belirlemek için lineer burkulma analizi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar göçme mekanizmalarının detaylı bir şekilde irdelenmesine katkı sağlamıştır.

Kullanılan IDEA StatiCa [15] programı, Eurocode (EN) [16] standartlarına uygun analizler gerçekleştirebilme özelliğine sahip olup, modelde tanımlanan malzeme özellikleri ve sınır koşulları ile birlikte gövde boşluklarının etkilerini doğru bir şekilde temsil edebilmektedir. Çelik malzemenin daha önce belirtilen özellikleri (E=200 GPa, υ=0,3, F_y=355 MPa) tanımlanmış; boşluk çevresindeki yapısal davranış hassas bir şekilde analiz edilmiştir. Ayrıca, boşluk çevresine eklenen güçlendirme düzenlemelerinin etkinliği, taşıma kapasitesi, maksimum gerilme dağılımları ve plastik şekil değiştirme değerleri açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında her bir model için yapılan analizler; malzeme bakımından doğrusal olmayan analiz (MNA), lineer burkulma analizi (LBA), geometrik ve malzeme bakımından doğrusal olmayan, geometrik ve malzeme kusurlarını etkisini dikkate alan analizler (GMNIA) şeklinde sıralanmaktadır. Tüm modeller için yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar referans model olarak dikkate alınan boşluksuz kirişin analiz sonuçları baz alınarak karşılaştırılmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

Bu bölümde, çalışma kapsamında oluşturulan kiriş modelleri üzerinde gerçekleştirilen doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerin sonuçları sunulmaktadır. Önceki bölümde detaylandırılan farklı güçlendirme yöntemlerinin kirişin yapısal davranışı üzerindeki etkileri, doğrusal olmayan analizler ile değerlendirilmiştir. Gövde boşluklarının yapısal performans üzerindeki etkilerini ve farklı güçlendirme yöntemlerinin bu etkileri nasıl minimize ettiğini ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilen analizler doğrultusunda, elde edilen sonuçlar göçme yükü, göçme momenti, göçme mekanizması, maksimum yer değiştirme, gerilme dağılımları ve plastik mafsal oluşum bölgeleri açısından detaylı bir şekilde incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Öncelikle, referans model ile gövde boşluğu içeren ve herhangi bir güçlendirme uygulanmamış model karşılaştırılarak boşluk kaynaklı taşıma kapasitesi kayıpları belirlenmiştir. Ardından, boşluk çevresine farklı güçlendirme düzenlemeleri uygulanarak bu yöntemlerin kirişin yapısal performansı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Güçlendirme yöntemlerinin etkinliği, taşıma kapasitesindeki artış, göçme mekanizması ve gerilme dağılımı gibi parametreler doğrultusunda değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen malzeme ve geometrik doğrusal olmayan analizler (GMNIA) kapsamında, tüm kiriş modellerinin göçme anındaki kritik yükleri belirlenmiş ve bu durumdaki gerilme dağılımları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen analiz sonuçlarına ilişkin gerilme dağılımları, aşağıdaki şekillerde sunulmaktadır. (Şekil 13-23).

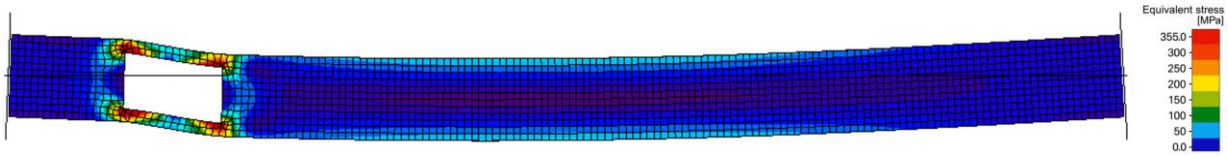
Şekil 13'te gövdesinde boşluk bulunmayan dolu kesitli çelik kirişten oluşan referans modelin, gerilme dağılımı görülmektedir. Şekil 13 incelendiğinde, gerilme dağılımının kiriş boyunca nispeten homojen bir şekilde yayılmış olduğu, maksimum gerilmelerin kirişin açıklık ortasında oluştuğu görülmektedir. Plastikleşme, ağırlıklı olarak orta bölgede yoğunlaşmış ve bu bölgedeki plastik mafsal oluşumu göçme mekanizmasını belirlemiştir. Bu dağılım, klasik eğilme teorisine uygun olarak moment etkisinin en fazla olduğu bölgede göçme oluştuğunu göstermektedir.



Şekil 13. Referans model için analiz sonucunda elde edilen göçme anındaki gerilme dağılımı

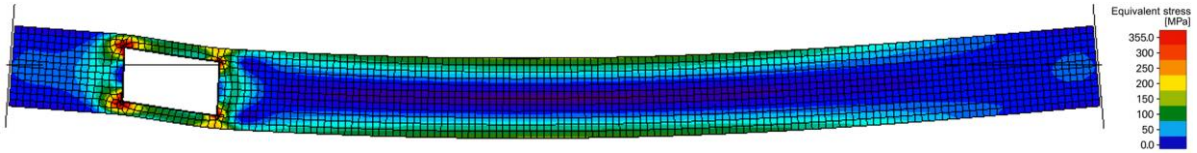
Model 1 olarak isimlendirilen gövdesinde tesisat boşluğu açılmış olan kirişe ait gerilme dağılımı Şekil 14'te görülmektedir. Güçlendirme amacıyla herhangi bir takviyenin uygulanmadığı söz konusu Model 1'de gerilme dağılımının, boşluğun köşelerinde yoğun gerilme yığılmaları şeklinde oluştuğu görülmüştür. Kirişin taşıma kapasitesi, ikincil eğilme (Vierendeel) mekanizması nedeniyle önemli ölçüde azalmış ve plastik mafsallar, özellikle boşluk köşelerinde oluşmuştur. Gerilmelerin büyük kısmı boşluğun

alt ve üst kenarlarındaki "T" kesitlerinde yoğunlaşarak, bu bölgelerde ani taşıma kapasitesi kaybına neden olmuştur.



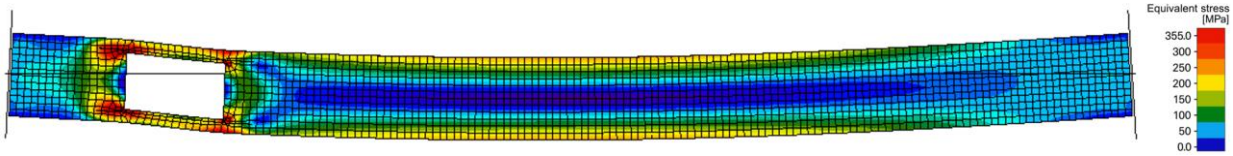
Şekil 14. Model 1 için analiz sonucunda elde edilen göçme anındaki gerilme dağılımı

Şekil 15'te sunulan Model 2'de boşluğun etrafı çevresel rijitlik levhaları ile güçlendirilmiştir. Bu takviye sayesinde gerilme yığılmalarının bir miktar azaldığı gözlemlenmektedir. Ancak, rijitlik levhaları dikdörtgen kesitli boşluk çevresine yayıldığı için, boşluk köşelerinde gerilme yığılmaları nedeniyle yüksek gerilmeler mevcuttur. Plastik mafsalların dağılımı referans modele kıyasla farklılık göstermekte olup, rijitlik levhaları gerilmelerin belirli noktalarda yoğunlaşmasını önlemiştir.



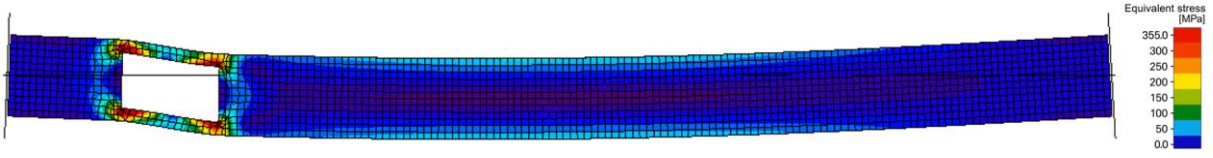
Şekil 15. Model 2 için analiz sonucunda elde edilen göçme anındaki gerilme dağılımı

Şekil 16'da yatay rijitlik levhası kullanılarak tesisat boşluğu bölgesi takviye edilmiş (Model 3) kirişin göçme anındaki gerilme dağılımı görülmektedir. Uygulanan yatay rijitlik levhaları sayesinde bu modelde gerilme yığılmaları yatay doğrultuda genişlemiş, ancak düşey yönde halen belirgin bir şekilde gerilme aktarımı sağlanmadığı görülmüştür. Yatay rijitlik levhaları, boşluk üst ve alt kenarlarındaki "T" kesitlerini daha rijit hale getirmiş ve göçme mekanizmasını kısmen değiştirmiştir. Model 1'e göre kapasite artışı sağlanmış ancak göçme mekanizması büyük ölçüde ikincil eğilme etkisiyle oluşmaktadır.



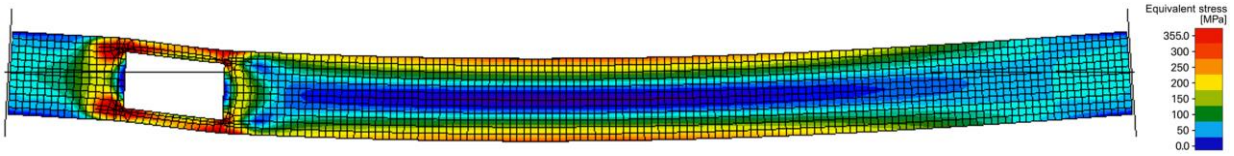
Şekil 16. Model 3 için analiz sonucunda elde edilen göçme anındaki gerilme dağılımı

Şekil 17'de sadece düşey rijitlik levhaları ile takviye edilmiş (Model 4) kirişin göçme anındaki gerilme dağılımı görülmektedir. Bu modelin gerilme dağılımı büyük ölçüde Model 1'e benzemektedir, ancak düşey rijitlik elemanları ikincil eğilme mekanizmasını doğrudan engellememektedir. Taşıma kapasitesinde belirgin bir artış gözlemlenmemiştir. Düşey rijitlik levhalarının burulma stabilitesine katkı sağladığı ancak ikincil eğilme göçmesini engelleyemediği görülmüştür.



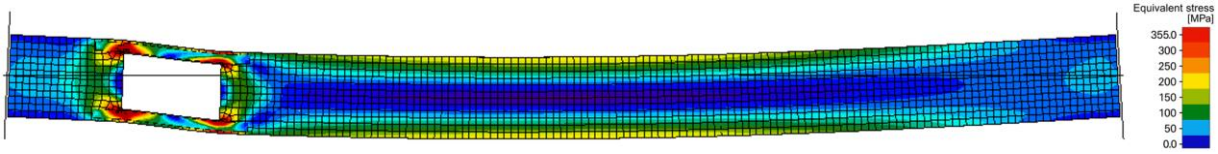
Şekil 17. Model 4 için analiz sonucunda elde edilen göçme anındaki gerilme dağılımı

Şekil 18'de hem yatay hem de düşey rijitlik levhası kullanılarak takviye edilmiş (Model 5) kirişin göçme anındaki gerilme dağılımı görülmektedir. Bu modelde uygulanan takviye yöntemi sayesinde gerilme dağılımı daha homojen hale gelmiş ve boşluk köşelerindeki gerilme yığılmaları önemli ölçüde azalmıştır. Göçme mekanizması ikincil eğilmeden yanal burulmalı burkulmaya dönüşmüştür, bu da kirişin kapasitesini artırarak daha dengeli bir taşıma sağladığını göstermektedir. Bu model, analizlerde referans kirişe yakın taşıma kapasitesine yaklaşan en başarılı sonuçlardan birini vermiştir.



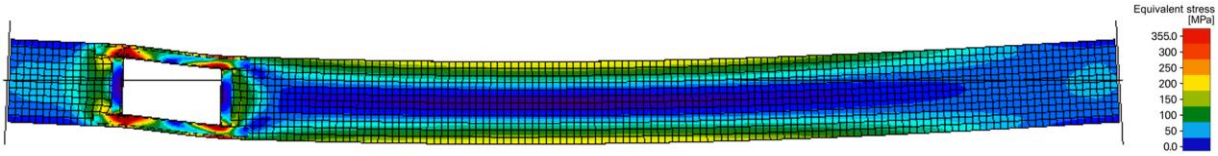
Şekil 18. Model 5 için analiz sonucunda elde edilen göçme anındaki gerilme dağılımı

Yatay gövde çiftleme levhalı kirişin (Model 6) göçme anındaki gerilme dağılımı Şekil 19'da sunulmuştur. Bu modelde gövde boşluğunun üst ve alt kenarlarına eklenen çiftleme levhaları sayesinde gerilme dağılımı, Model 3'e benzer bir şekilde yatay doğrultuda iyileşmiş ancak düşey doğrultuda sınırlı kalmıştır. Bu takviye yöntemi rijitlik artışı sağlasa da boşluk çevresinde belirgin bir gerilme yığılmasının oluştuğu görülmüştür.



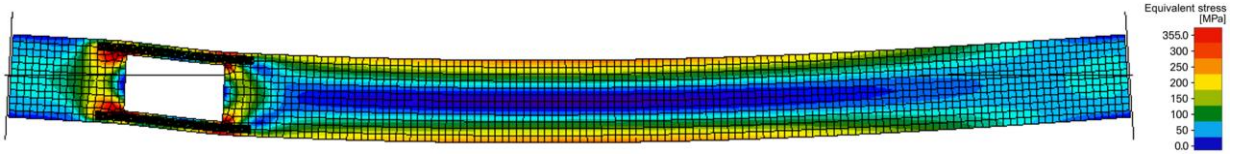
Şekil 19. Model 6 için analiz sonucunda elde edilen göçme anındaki gerilme dağılımı

Hem yatay hem de düşey gövde çiftleme levhalı (Model 7) kirişin göçme anındaki gerilme dağılımı Şekil 20'de verilmiştir. Söz konusu modelde uygulanan takviye yöntemi sayesinde boşluk çevresinde oluşan gerilme yığılmaları büyük ölçüde azaltılmış ve elemanın yük taşıma kapasitesi artırılmıştır. Plastikleşme, boşluğun köşe noktalarından daha geniş bir alana yayılmıştır. Buna göre söz konusu modelin sonuçları da Model 5'e benzer şekilde başarılı bir sonuç vermiştir.



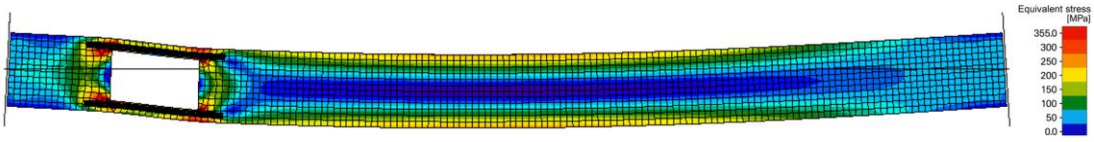
Şekil 20. Model 7 için analiz sonucunda elde edilen göçme anındaki gerilme dağılımı

Tesisat boşluğu çevresi "L" profiller ile güçlendirilmiş (Model 8) kirişin göçme anındaki gerilme dağılımı Şekil 21'de görülmektedir. Bu modelde boşluğun çevresinin L profilleri ile güçlendirilmesiyle gerilme dağılımı daha dengeli hale gelmiş, ancak boşluk köşelerinde hala belirli miktarda gerilme yığılması oluşmuştur. L profillerin burulma stabilitesine katkıda bulunduğu ancak plastikleşme bölgesini genişletemediği görülmektedir.



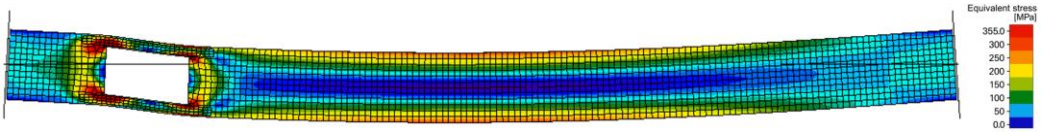
Şekil 21. Model 8 için analiz sonucunda elde edilen göçme anındaki gerilme dağılımı

Tesisat boşluğu çevresi "U" profil kullanılarak takviye edilmiş kirişin (Model 9) göçme anındaki gerilme dağılımı Şekil 22'de sunulmaktadır. U enkesitli profillerin boşluğun alt ve üst kenarlarına kaynaklanması ile uygulanan takviye yöntemi kirişin burulma rijitliğini artırmış olsa da eğilme kapasitesindeki iyileşme nispeten sınırlı kalmıştır. Bu takviye yöntemi sayesinde boşluk köşelerindeki gerilme yığılmaları azalmıştır, ancak homojen bir dağılım tam anlamıyla sağlanamadığı görülmüştür.



Şekil 22. Model 9 için analiz sonucunda elde edilen göçme anındaki gerilme dağılımı

Son olarak tesisat boşluğu çevresi çapraz şekilde konumlandırılmış levhalar ile takviye edilmiş kirişe (Model 10) ait göçme anındaki gerilme dağılımını gösteren görsel Şekil 23'te sunulmuştur. Bu modelde boşluk üst ve alt kenarından kesitin üst ve alt flanşına uzanacak şekilde çapraz pozisyonda yerleştirilen levhalar sayesinde elemandaki gerilme dağılımı nispeten dengeli bir hale gelmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde çapraz şekilde yerleştirilen levhaların boşluk çevresindeki rijitliği artırarak taşıma kapasitesini arttırdığı görülmektedir. Söz konusu modelin sonuçları Model 5 ile birlikte referans kirişin taşıma kapasitesine iyi yaklaşan modellerden olduğu görülmüştür.

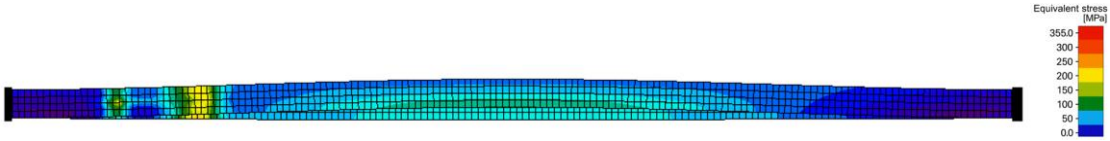


Şekil 23. Model 10 için analiz sonucunda elde edilen göçme anındaki gerilme dağılımı

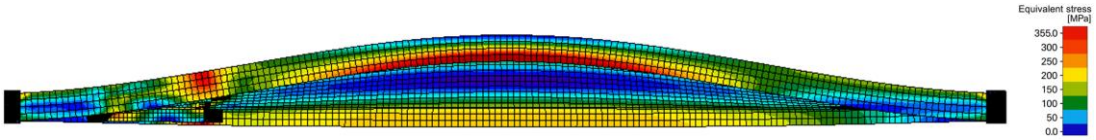
Genel olarak Şekil 13-23 incelendiğinde, referans modelde kirişin açıklık ortasında plastikleşme gerilmesine ulaşan geniş bir bölgenin oluştuğu ve bu bölgedeki plastik mafsal gelişimi sonucu kirişin göçme mekanizmasına geçtiği gözlemlenmektedir. Model 1'de, gövdeye açılan boşluğun etkisiyle ikincil eğilme (Vierendeel) mekanizmasının tetiklendiği ve plastik mafsalların özellikle boşluk köşelerinde oluştuğu görülmektedir. Boşluk çevresinde yüksek gerilme yığılmalarına rağmen, kirişin diğer bölgelerinde taşıma kapasitesinin önemli ölçüde azaldığı ve boşluk çevresi dışındaki alanların gerilme aktarımında neredeyse pasif kaldığı görülmüştür.

Güçlendirme uygulanan modellerde, özellikle Model 3, 5, 8, 9 ve 10'da, boşluk çevresindeki gerilme dağılımlarının daha dengeli olduğu ve kirişin nispeten daha yüksek taşıma kapasitesiyle çalıştığı belirlenmiştir. Bu durum, söz konusu güçlendirme stratejilerinin yapısal performans üzerindeki olumlu etkisini kanıtlamakta ve diğer güçlendirme türlerine kıyasla daha verimli sonuçlar sunduğunu göstermektedir.

Model 1 ve Model 5'te, ikincil eğilme mekanizması ile yanal burulmalı burkulma mekanizmasının karşılaştırıldığı GMNIA/LBA analizleri sonucunda, bu iki model arasındaki gerilme dağılımı ve yanal şekil değiştirme farklılıkları Şekil 24 ve 25'te verilmektedir. Güçlendirme uygulanmayan Model 1'de, kiriş herhangi bir geometrik kusur içermeden ikincil eğilme etkisiyle göçmeye ulaştığından, yanal yer değiştirme değerleri ihmal edilebilir seviyede kalmıştır. Buna karşın, Model 5'te uygulanan güçlendirme sayesinde ikincil eğilme mekanizmasının önlendiği ve kirişin göçmeye yanal burulmalı burkulma mekanizmasıyla ulaştığı belirlenmiştir. Bu analizler, uygun güçlendirme düzenlemelerinin kirişin göçme mekanizmasını değiştirerek taşıma kapasitesini artırabileceğini açıkça ortaya koymaktadır.

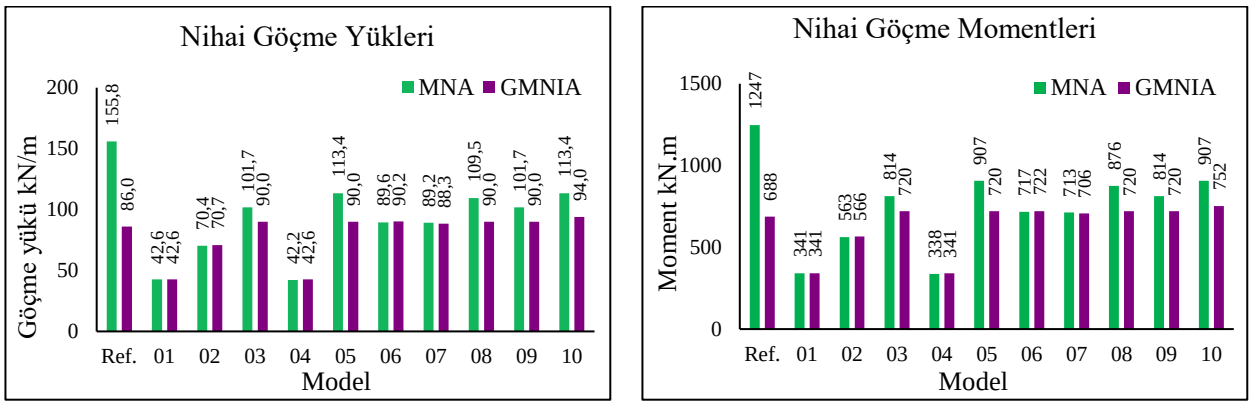


Şekil 24. Model 1 için GMNIA analiz sonucunda elde edilen göçme anındaki gerilme dağılımı



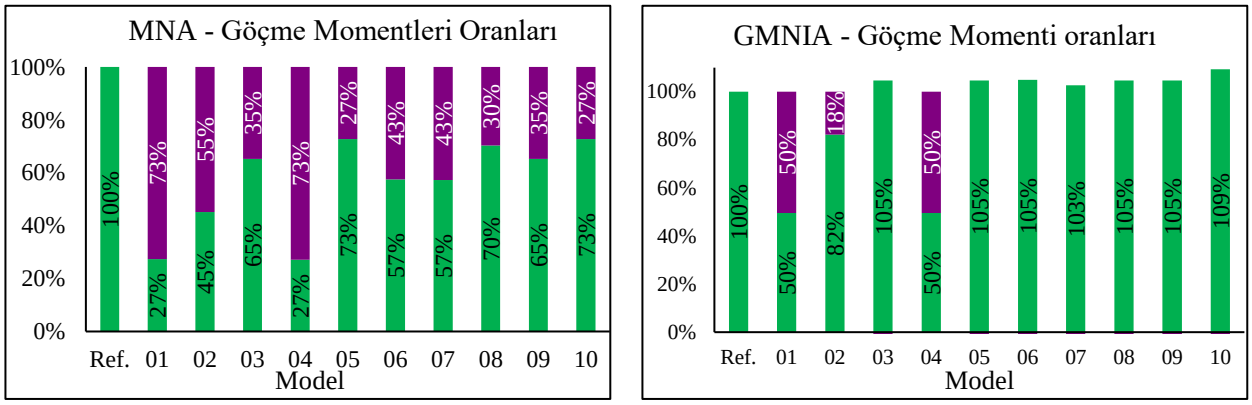
Şekil 25. Model 5 için GMNIA analiz sonucunda elde edilen göçme anındaki gerilme dağılımı

Yapılan MNA ve GMNIA analizleri sonucunda tüm kiriş modelleri için elde edilen göçme yükleri, göçme momentleri, düşey ve yatay yer değiştirme değerleri Şekil 26-28'de verilmiştir. Plastisite teorisine uygun gerçekleştirilen analizler sonucunda kirişin gövdesinde açılan tesisat boşluğu kirişin taşıma kapasitesinin %73 oranda azalmasına neden olmuştur (Şekil 27-a). Uygulanan bazı güçlendirme yöntemleri kirişin taşıma kapasitesinde %73 oranına kadar (Model 5, 10) geri kazanım sağlamışken Model 4'te yapılan takviye düzenlemesinin (sadece düşey rijitlik levhalarıyla güçlendirme) kirişin taşıma kapasitesi üzerinde hiçbir etkisi olmadığı görülmüştür. Ancak söz konusu düşey rijitlik levhaların yatay rijitlik levhalarıyla birlikte kullanıldığı zaman kirişin taşıma kapasitesinin %65'ten %73'e kadar çıkmasında katkıda bulunduğu görülmektedir. Bu durumun söz konusu düşey levhaların yatay rijitlik levhalarının burkulma boyunun kısaltmasından kaynaklı olduğu söylenebilir.



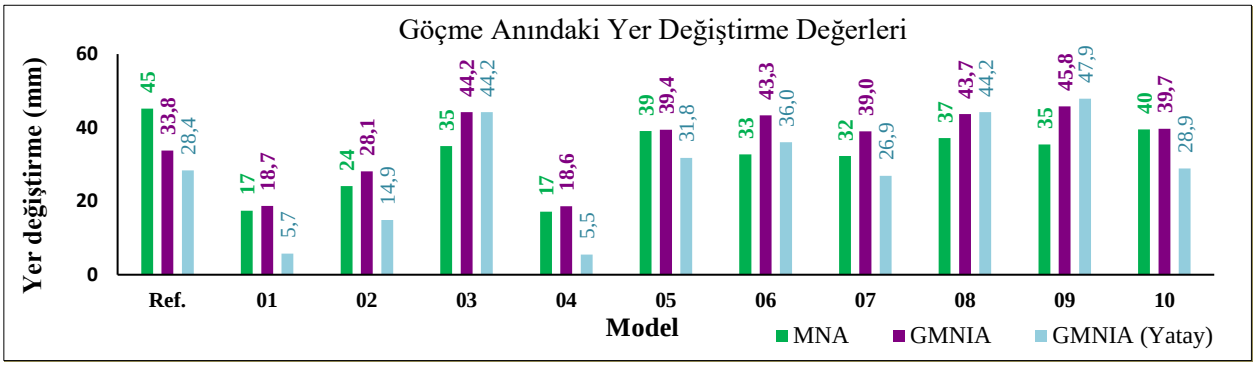
(a) (b)

Şekil 26. Tüm modellerin analiz sonuçlarına göre nihai kapasitelerinin karşılaştırılması



(a) (b)

Şekil 27. Analizler sonucunda referans modele göre hesaplanan göçme momenti oranları



Şekil 28. Analizler sonucunda tüm modeller için elde edilen göçme anındaki yatay ve düşey yer değiştirmeler

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen, geometrik önkusurları da dikkate alan analizler, bazı modellerin gövde boşluklu olmasına rağmen referans modele kıyasla daha yüksek taşıma kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 27-b). Bu durum özellikle Model 3, 5, 6, 7, 8, 9 ve 10'un yatay güçlendirme elemanları içermesiyle ilişkilidir. Buna göre başlıklara paralel olarak yerleştirilen bu yatay rijitlik elemanları, betonarme kirişlerdeki gövde donatısı gibi çalışarak kesitin burulma rijitliğini artırmış ve burkulma dayanımını önemli ölçüde de iyileştirmiştir. Gövde boşluğunun kirişin kesme kapasitesi ve yanal burulmalı burkulma davranışı üzerindeki olumsuz etkisine rağmen, bu bölgedeki rijitlik artırıcı elemanların etkili bir stabilite sağladığı görülmüştür.

Gerçekleştirilen analizler sonucunda, tüm modellerde yatay ve düşey yer değiştirmeler incelendiğinde, ikincil eğilme (Vierendeel) mekanizması ile göçmeye ulaşan modellerin göçme öncesinde nispeten küçük yer değiştirmelerle sınırlı kaldığı görülmüştür (Şekil 28). Bu modellerde gerilme yığılmalarının belirli noktalarda yoğunlaştığı ve bu bölgelerde malzemenin sınır kopma şekil değiştirmesine ulaştığı tespit edilmiştir. Özellikle Model 1 ve

Model 4'te, gövde boşluğu nedeniyle kirişin ikincil eğilme mekanizmasıyla göçmeye geçtiği belirlenirken, Model 3, 5, 8, 9 ve 10'da uygulanan güçlendirme yöntemlerinin katkısıyla yanal burulmalı burkulma mekanizmasının baskın hale geldiği görülmüştür. Model 2'de ise ikincil eğilme ve yanal burulmalı burkulmanın ortak etkisi altında göçme gerçekleşmiştir.

Elde edilen bulgular, gövdesinde boşluk açılmış çelik kirişlerin uygun güçlendirme yöntemleriyle taşıma kapasitesi kayıplarının belirli oranlarda telafi edilebileceğini ve bazı güçlendirme stratejilerinin diğerlerine kıyasla daha etkin sonuçlar sunduğunu ortaya koymaktadır.

4 Sonuçlar ve öneriler

Bu çalışmada çelik kirişlerin gövdelerinde açılan dikdörtgen kesitli tesisat boşluklarının yapısal performansa etkileri karşılaştırmalı olarak incelemiş ve çeşitli güçlendirme düzenlemelerinin etkinliği değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen analizler, boşlukların kirişlerin taşıma kapasitesinde ve göçme davranışında önemli değişimlere yol açtığını göstermiştir. Yapılan karşılaştırmalı değerlendirmeler neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmaktadır:

i-) Gövde boşluklarının yapısal performansa etkisi

Kiriş gövdesinde açılan boşluklar, taşıma kapasitesinde belirgin bir azalmaya neden olmuş ve kirişin göçme mekanizmasını değiştirmiştir. Boşluk içeren kirişlerin, ikincil eğilme (Vierendeel) mekanizması ile göçmeye geçtiği ve özellikle boşluk köşelerinde gerilme yığılmalarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Yapılan analizler, boşluk nedeniyle kirişin taşıma kapasitesinin %73 oranında azaldığını ortaya koymuştur.

ii-) Güçlendirme yöntemlerinin etkinliği

Boşluk çevresine uygulanan farklı güçlendirme düzenlemeleri, taşıma kapasitesinde ve göçme mekanizmasında birtakım iyileştirmeler ve kapasitede nispeten geri kazanımlar sağlamıştır. Özellikle hem yatay hem de düşey rijitlik levhalarıyla güçlendirilmiş modeller (Model 5 ve Model 10) en yüksek performans artışını sergileyerek kapasite kaybını büyük ölçüde telafi etmiştir. Yalnızca düşey rijitlik levhaları (Model 4) kullanılan güçlendirme düzenlemesinin ise taşıma kapasitesine belirgin bir katkı sağlamadığı görülmüştür. Bununla birlikte, düşey rijitlik levhalarının yatay rijitlik levhaları ile birlikte kullanılması, taşıma kapasitesindeki artışta etkili olmuştur. Yatay rijitlik elemanlarının, gövde boşluklu kirişlerde burulma rijitliğini artırdığı ve kesitin stabilitesini önemli ölçüde iyileştirdiği belirlenmiştir. Bu durum, kirişin ikincil eğilme göçme mekanizmasından çıkarak yanal burulmalı burkulma ile göçmeye uğramasını sağlamıştır.

iii-) Gerilme Dağılımı ve Göçme Mekanizmaları

Referans modelde, plastikleşme gerilmesine ulaşan geniş bir bölge oluşurken, boşluklu modelde ise gerilme yığılmalarının sadece boşluğun köşe noktalarında yoğunlaştığı görülmüştür. Güçlendirme elemanlarının eklenmesi ile gerilme dağılımı nispeten daha homojen hale gelmiş ve lokal buruşmaların ve plastik mafsalların oluşumunu geciktirmiştir. Model 5 ve Model 10 gibi etkili güçlendirme düzenlemeleriyle göçme mekanizmasının değiştirildiği ve söz konusu kirişlerin güçlendirilen modeller içerisinde daha yüksek taşıma kapasitesi ile çalıştığı gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak kiriş gövdesinde tesisat vb. amaçlarla açılması düşünülen boşluk, yukarıda bahsedilen sakıncalarından dolayı önerilmemekle beraber açılma ihtiyacı durumunda mutlaka takviye edilmesi gerekmektedir. Diğer bir ifadeyle tesisat vb. nedenlerle kiriş gövdesine açılan boşluğun söz konusu kirişin taşıma kapasitesi başta olmak üzere davranışını önemli ölçüde değiştirdiğinden farklı nedenlerle kiriş gövdesine boşluk açılması durumunda boşluk çevresinin etkin bir şekilde güçlendirilmesi gerektiği önerilmektedir. Ayrıca gövdede açılan boşluk çevresini güçlendirmek amacıyla uygulanan güçlendirme yöntemlerinin etkinliğinin değerlendirilmesi için gerçekleştirilen analizlerden özellikle Model 5 ve Model 10'un diğer güçlendirme yöntemlerine göre daha uygun sonuçlar verdiği görülmüştür.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

[1] M. Maali and N. Çınar, Experimental and numerical tests on beams with web openings under cyclic loading, International Journal of Civil Engineering, 2024. https://doi.org/10.1007/s40999-024-01025-5.

[2] F. Rodrigues, P. C. G. S. Da Vellasco, L. R. O. De Lima, S. A. L. De Andrade, and J. G. S. Da Silva, Finite element modelling of steel beams with web openings, Scientific Research Publishing Inc., vol. 6, pp. 886–913, 2014. https://doi.org/10.4236/eng.2014.613082.

[3] A. K. Mata, B. S. Bhagat, and N. D. Gami, Parametric study of steel beam with web opening of different shape, size and position using finite element method, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), vol. 5, no. 4, pp. 3404–3408, 2018. https://www.irjet.net/archives/V5/i4/IRJET-V5I4767.pdf.

[4] M. M. Abdel-Ghaffar, K. G. Metwally, and B. M. Allam, Effect of stiffening types on steel I-beams with web openings, Journal of Engineering and Applied Science, vol. 65, 2018. https://www.researchgate.net/publication/325314433.

[5] G. Doğan, Berkitme levhalarının dairesel boşluklu çelik kirişlerin yük taşıma kapasitelerine etkilerinin sonlu elemanlar yöntemiyle analizi, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2021.

[6] A. Al-Rifaie, A. S. Al-Husainy, T. Al-Mansoori, and A. Shubbar, Flexural impact resistance of steel beams with rectangular web openings, Case Studies in Construction Materials, vol. 14, pp. 1–6, 2021. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00509.

[7] M. F. Ertenli, I. Kalkan ve A. Büyükkaragoz, Gövde buruşmalarının elastik olmayan yanal burkulma sınır

uzunluğuna etkisi. Politeknik Dergisi, 24(1), 347-354,2021. https://doi.org/10.2339/politeknik.821093.

[8] J. L. Abbas, Behavior of steel I beams with web openings, Civil Engineering Journal (Iran), vol. 9, no. 3, pp. 596–617, 2023. https://doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-03-08.

[9] M. F. Ertenli, E. Erdal, A. Buyukkaragoz, I. Kalkan, C. Aksoylu, and Y. O. Özkılıç, Lateral torsional buckling of doubly-symmetric steel cellular I-beams, Steel and Composite Structures, vol. 46, no. 5, pp. 709–718, 2023. https://doi.org/10.12989/scs.2023.46.5.709.

[10] R. Aydın, E. Yuksel, N. Yardımcı, M. H. Kısa and T. Gokce, In-plane behaviour of beam-to-column connections of corrugated web I-sections. Journal of Constructional Steel Research, 100, 183-196, 2014. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.04.013.

[11] K. F. Chung, T. C. H. Liu and A. C. H. Ko, Investigation on vierendeel mechanism in steel beams with circular web openings. Journal of Constructional steel research, 57(5), 467-490, 2001. https://doi.org/10.1016/S0143-974X(00)00035-3.

[12] K. F. Chung, C. H. Liu and A. C. H. Ko, Steel beams with large web openings of various shapes and sizes: an empirical design method using a generalised moment-shear interaction curve, Journal of Constructional Steel Research, 59(9), 1177-1200, 2003. https://doi.org/10.1016/S0143-974X(03)00029-4.

[13] K. D. Tsavdaridis and C. D'Mello, Web buckling study of the behaviour and strength of perforated steel beams with different novel web opening shapes. Journal of Constructional Steel Research, 67(10), 1605-1620, 2011. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.04.004.

[14] A. Z., Abidin and B. A. Izzuddin, Meshless local buckling analysis of steel beams with irregular web openings, Engineering Structures, 50, 197-206, 2013. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.10.006.

[15] IDEA StatiCa, Structural Design Software for Steel and Concrete (24.1.1.1474), 2025. www.ideastatica.com.

[16] Eurocode 3, Design of Steel Structures, 2005. https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/EN-Eurocodes/eurocode-3-design-steel-structures.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 957-964
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
Araştırma makalesi / Research article
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Development and characterization of Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM) rubber reinforced by green material lignin

Yeşil malzeme lignin ile güçlendirilmiş Etilen Propilen Dien Monomer (EPDM) kauçuğunun geliştirilmesi ve karakterizasyonu

Sibel Dikmen Küçük[1,*]

[1] *Düzce University, Cosmetic Research Laboratory, 81620, Düzce Türkiye*

Abstract

Effects of lignin on the rheological, mechanical, chemical and aging properties of ethylene propylene diene monomer (EPDM) rubber used in the production of sealing profiles were investigated. It is reinforced with carbon black to provide the necessary conditions in all automotive vehicles. However, all automotive manufacturers have started to research biodegradable materials instead of petroleum-based products in vehicles due to environmental problems and human health threats. Therefore, the possibility of using lignin instead of carbon black was investigated. EPDM plate samples were prepared by adding different amounts of commercial lignin, lignin black solution and maleic anhydride modified forms. The effects of lignin as a filler were analyzed rheologically, mechanically and chemically. Also surfaces were checked by scanning electron microscope after ageing. Commercial lignin made EPDM more resistant to ultraviolet and weathering, while unmodified black solution made it less resistant than carbon black. Adding commercial lignin and its modified form instead of carbon black provided the best mechanical properties. Additionally, it was determined that the addition of lignin as a filler did not cause any chemical degradation in the EPDM matrix.

Keywords: Lignin, EPDM, Green materials, Biodegradable fillers

Öz

Sızdırmazlık profilleri üretiminde kullanılan etilen propilen dien monomer (EPDM) kauçuğunun reolojik, mekanik, kimyasal ve yaşlanma özellikleri üzerine ligninin etkileri incelenmiştir. Tüm otomotiv araçlarında gerekli koşulları sağlamak için karbon siyahı ile takviye edilmektedir. Ancak tüm otomotiv üreticileri çevresel sorunlar ve insan sağlığı tehditleri nedeniyle araçlarda petrol bazlı ürünler yerine biyolojik olarak parçalanabilen malzemeler araştırmaya başlamıştır. Bu nedenle karbon siyahı yerine lignin kullanma olasılığı araştırılmıştır. Ticari lignin, ligninin siyah çözeltisi ve maleik anhidrit ile modifiye edilmiş formlarının farklı miktarlarda eklenmesiyle EPDM plaka numuneleri hazırlanmıştır. Ligninin dolgu maddesi olarak etkileri reolojik, mekanik ve kimyasal olarak analiz edilmiştir. Ayrıca yaşlandırıldıktan sonra yüzeyler taramalı elektron mikroskobu ile kontrol edilmiştir. Ticari lignin, EPDM'yi ultraviyole ve hava koşullarına karşı daha dirençli hale getirirken, modifikasyonsuz siyah çözelti, onu karbon siyahından daha az dirençli hale getirmiştir. Karbon siyahı yerine ticari ligninin ve modifiye edilmiş formunun eklenmesi en iyi mekanik özellikleri sağlamıştır. Ayrıca dolgu maddesi olarak lignin ilavesinin EPDM matrisinde herhangi bir kimyasal bozunmaya neden olmadığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Lignin, EPDM, Yeşil malzemeler, Bozunabilir dolgu malzemeleri

1 Introduction

EPDM is a synthetic rubber which is produced by unsaturated diene monomer addition during the copolymerization of ethylene and propylene. Ethylene propylene diene monomer rubber is widely used in sealing profiles, roofing materials, sporting goods, gaskets, barriers, hoses, cables, etc. due to its ultraviolet resistance, waterproof structure, ability to form mixtures at low cost, oil retention properties, ozone and heat resistance, and good mechanical/physical properties [1-3]. However, reinforcing fillers such as organic or inorganic materials are always required in the EPDM matrix to improve its physical, chemical, rheological, morphological, and aging properties [4]. Inorganic fillers such as carbon black (CB) and white fillers (talk, silica) are harmful for health and the environment. Organic biodegradable fillers such as lignin and cellulose started to be researched recently in many industries because of limited usage of inorganic fillers [4-6].

Lignin, a three-dimensional biopolymer, is the second most abundant renewable, natural, and degradable resource, next to cellulose [7,8]. It is a macromolecule composed of 9-carbon phenol propane units (p-coumaryl alcohol, coniferyl alcohol, sinapyl alcohol) linked together by different types of bonds. Its chemical functional groups include hydroxyl, methoxyl, carbonyl, and carboxyl groups, which confer benefits and special functional properties to lignin, such as reinforcement, stabilization [9], ultraviolet absorption, biodegradability, and antifungal and antibiotic activity [10-12].

* Corresponding author, e-mail: sibelkucuk@duzce.edu.tr (S. Dikmen Küçük)
Geliş / Received: 25.02.2025 Kabul / Accepted: 14.05.2025 Yayımlanma / Published: xx.xx.20xx
doi: 10.28948/ngumuh.1646602

Many studies [13-16] and patents [17-21] show that lignin can be used in rubber formulations as filler instead of carbon black due to its good physical, mechanical and chemical properties such as low density, non-toxic property, recyclability and non-conductive property. Obtaining value-added products from lignin such as usage of it as filler, is important in terms of environmental and economic factors. In order to be used as a reinforcement in rubber, the particle size of the lignin and the strong interfacial bond with the rubber matrix should be adjusted. In previous studies, lignin was used instead of resorcinol in the hexamethylenetetramine, resorcinol and hydrated silica (HRH) bonding system for ethylene propylene diene monomer (EPDM)/microcrystalline cellulose (MCC) composites [22,23]. There are not many studies in the literature where lignin is used as reinforcement in EPDM rubber. Microcrystalline cellulose (MCC) and lignin were used instead of EPDM and carbon black and their effects were investigated together [24,25]. However, in these studies, lignin were used in ready-to-use powder form. The aim of this study is to investigate the distribution of lignin black solution obtained by precipitating from pulp black liquor in our pulp production facility with Indulin AT, a new pine kraft lignin commercialized by Meadwestvaco for the last 60 years [26], in the EPDM matrix and its effect on EPDM. Thus, our main goal is to investigate the usability of lignin as a biodegradable filler material instead of petroleum-based fillers in the rubber industry.

2 Material and method

2.1 Material

The EPDM was supplied by the company Standard Profile (Duzce, Turkey). The production formulation of EPDM is given in Table 1. The additives were given with units of parts per hundred parts of rubber (phr). In the components used in the formulas, the amounts of EPDM (100 phr), oils (63 phr), initiator (11 phr), white fillers (75 phr) such as calcium carbonate ($CaCO_3$) and silicon dioxide (SiO_2) and sulphur (6.5 phr) were constant, while the amounts of CB and lignin were changed. Commercial lignin formulas are named as CL, those prepared by black solution are named as BS, while the forms of both lignins modified with maleic anhydride are named as CL-MA and BS-MA.

Table 1. The production formulation of EPDM plates

Sample	CB	Lignin
CG	165	0
CL5	160	5
CL10	155	10
CL-MA5	160	5
CL-MA10	155	10
BS5	160	5
BS10	155	10
BS-MA5	160	5
BS-MA10	155	10

Lignin, commercial name Indulin AT, was supplied by Vestwaco (Virginia, USA), and lignin in the form of black solution was obtained from hazelnut shell waste in the pulp pilot-scale production facility established within the Düzce University Agricultural Waste Industrial Recycling Application and Research Center. The concentration of commercial lignin (Indulin AT) was 235.89 g/L 60 wt% ethanol solution at a solid-liquid ratio of 300 g lignin/L solvent. The number-average (M_n) and mass-average (M_w) molar mass values were M_n = 1336 and M_w = 4721, while the polydispersity value was 3.54. The phenolic hydroxyl group content for commercial lignin was 2.07 mmol/g [27].

2.2 Green composites manufacturing

Nine different compounds were prepared by adding 5.0 phr of commercial lignin (CL5), 10.0 phr of commercial lignin (CL10), 5.0 phr of commercial lignin modified with maleic anhydride (CL-MA5), 10.0 phr of commercial lignin modified with maleic anhydride (CL-MA10), 5.0 phr of black solution (BS5), 10.0 phr of black solution (BS10), 5.0 phr of black solution modified with maleic anhydride (BS-MA5), and 10.0 phr of black solution modified with maleic anhydride (BS-MA10). A total of 40 different plates were prepared, five for each compound, and 5 of the currently used EPDM paste were prepared as a control group (CG) for comparison. Thus, the analyses were performed on 45 different plates.

The raw materials of EPDM were firstly stirred in a lab-scale mixer with a capacity of 1.5 L (Carter Bros, F270, Manchester, England). Temperature was changing between 23 °C ± 2 °C to 100 °C. The duration of stirring was 5 min while the speed was 47 rpm. The compounds were passed through a lab-scale cylinder (ESER, Ankara, Turkey). After the cylinder the compounds were pressed for 7.5 min at 180 °C with a lab-scale compression press (ESER, Ankara, Turkey). Thus, EPDM plates were prepared for mechanical, chemical, and aging analysis.

2.3 Characterization of green composites

2.3.1 Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy analysis

FTIR spectroscopy is a powerful tool for monitoring vibrational energy levels in regions of different molecules. Changes in chemical properties are often monitored by FTIR spectroscopy, which is a very sensitive and non-destructive technique. It was performed using Shimadzu IRPrestige 21 spectrometer. FTIR spectra were recorded in the range of 450–4000 cm^{-1} at room temperature.

2.3.2 Mechanical properties

The mechanical analysis of the EPDM plates were performed in tensile, tear, and elongation tests. The tensile and elongation tests were performed according to DIN 53504 (2017), and the tear tests were performed according to DIN ISO 34-1 (2015) at 23 °C. The tests were performed via Zwick testing machine (Zwick Roell Z010, Ulm, Germany) which is a computer-controlled and has a speed of 200 mm/min. Six samples were used for testing.

2.3.3 *Rheological properties*

EPDM plates were analysed rheologically in terms of viscosity, scorch, and moving die rheometer (MDR). The Mooney viscosity tests were applied to see the simulation of flowing of the rubber in extruder. The duration of the test is (1+4) min at 100 °C. The aim of the scorch test is to reveal behavior of rubber during the period it remains in the extruder. The duration of the test is (1+20) min at 121 °C. The MDR tests were alse performed in order to measure the vulcanization times of ts2 (scorch time) and t90 (the 90% optimum vulcanization time of rubber) for 2.5 min at 180 °C. All of the rheological analysis were performed according to the standard ASTM 1646 (2018) with the machine of ALPHA Technologies MDR 2000 (Ohio, USA).

2.3.4 *Deformation properties as permanent set*

In rubber industry, deformation properties were measured as the term of permanent set test. The samples were firstly aged for 22h + 2h at 100 °C. After thermal aging the heights of the samples were measured with a device (Absolute 570, Mitutoyo, Aurora, USA) in order to calcuate the deformation according to the following equation:

$$Permanent\ set\ (\%) = \frac{h_i - h_f}{h_i - h_0} x100 \qquad (1)$$

The sample height before thermal aging is h_i, the sample height after thermal aging is h_f and the compression distance is h_0. Six samples were tested according to the standard DBL 5571 (2011).

2.3.5 *Artificial weathering test*

Natural weathering analysis take a very long time and have difficulties in reproducibility. For this reason, artificial weathering test with natural weathering conditions such as ultraviolet (UV) radiation, temperature, humidity and irradiance was applied to EPDM samples. The artificial weathering test was performed for 250 h in a weathering machine (Atlas Ci4000, Illinois, USA) according to Fiat Automotive Standard SAE J 2527 (2004). The UV radiation was between the wavelength of 300 nm to 400 nm at 70 °C. The relative humidity of analysis was 50% and irradiance intensity was 0.55-W/m².

2.3.6 *Scanning electron microscopy (SEM) analysis*

The SEM analysis were performed to the surfaces of the EPDM samples in order to characterize them morphologically by a machine (FEG 250, Oregon, USA). Since the plate surfaces were non-conductive, they were gold-plated before being placed in the device to make them conductive. After scanning electron micrographs were taken, EDX spectra were analysed for the chemical contents.

3 Results and discussions

3.1 *Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy analysis*

The chemical compositions of the EPDM plates were investigated by FTIR spectroscopy, and the results are shown in Figure 1.

Rubbers have complex spectra due to overlapping asymmetric, symmetric, and bending vibrations. The main chain in EPDM interacts at 2925 cm^{-1}, 2853 cm^{-1} which are asymmetric and symmetric stretchings. It contains also C-H bending vibrations at 1460 cm^{-1}, 1377 cm^{-1} that occurs due to CH_2 and CH_3 respectively in the ethylene, propylene, and diene monomers of the EPDM structure.

The spectra of the CS_2 group revealed crosslinking carbon-sulfur interactions, as shown at approximately 2320 cm^{-1} and approximately 2180 cm^{-1}.

The spectra of the CG, CL5, CL10, CL-MA5, CL-MA10, BS5, BS10, BS-MA5 and BS-MA10 were the same. It means that lignin did not degrade the matrix structure.

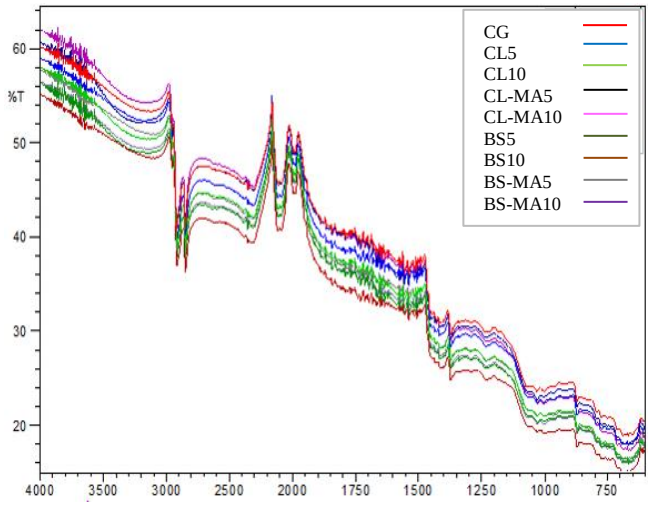


Figure 1. FTIR spectra of EPDM plates

3.2 *Mechanical properties*

The mechanical values such as tensile strength, tear strength and elongation at break of lignin filled EPDM samples are shown in Figure 2, Figure 3 and Figure 4, respectively.

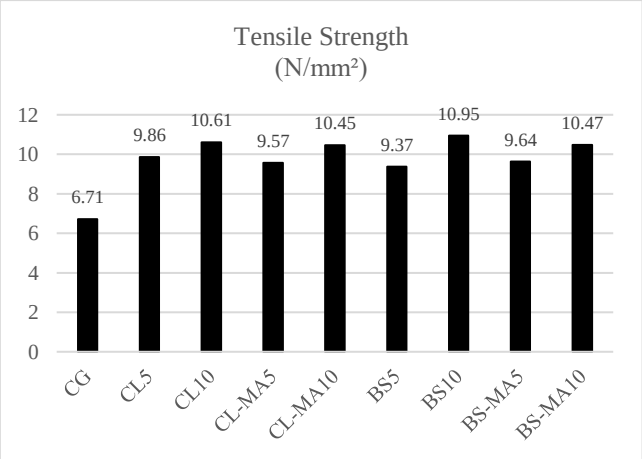


Figure 2. Tensile strength values of lignin filled EPDM

As shown in Figure 2, adding lignin to the currently used EPDM rubber increases tensile strength values, regardless of the lignin type and ratio. Xu et al. obtained similar results

after adding the lignin to the EPDM matrices [28]. This is attributed to the presence of a less cross-linked lignin phase, which makes stress transmission through the EPDM matrix difficult due to poor interface incompatibility [29]. Lignin modified with maleic anhydride further increases tensile strength values. This increase is probably due to the fact that after modification, lignin provides an increased contact surface with the EPDM, which promotes a better stress transfer [30,31].

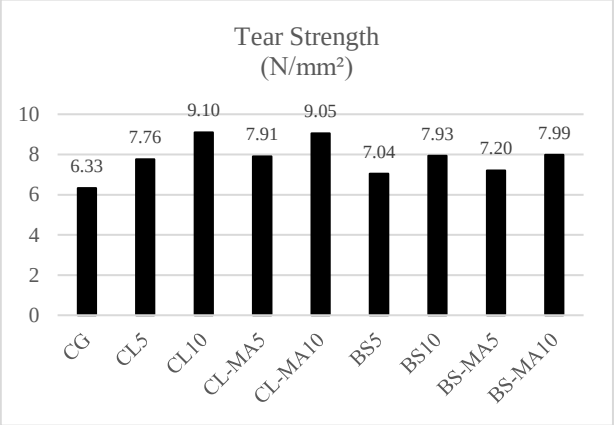


Figure 3. Tear strength values of lignin filled EPDM

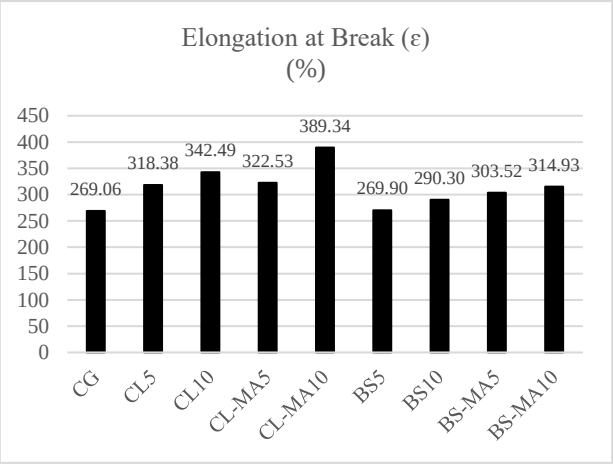


Figure 4. Elongation at break values values of lignin filled EPDM

Figure 3 shows that lignin increased the tear strength of the EPDM rubber with similar trend as tensile strength. Commercial lignin had more effect on the tear strength than did the black solution. The increase in the elongation at break values can be attributed to the 3D aromatic structure of lignin, which allows for high modulus. In addition, this 3D aromatic structure provided rigidity and more interaction between lignin and EPDM molecular segments [32]. As shown in Figure 4, lignin increased the elongation at break values. Commercial lignin had more effect on elongation than the black solution. The highest elongation values were those for maleic-anhydride-modified lignin. Thus, the modification of lignin with maleic anhydride increased the elongation of the EPDM rubber. This result means that adding lignin makes the rubber more elastic and more resistant, as desired.

3.3 Rheological properties

The rheological values such as mooney viscosity, mooney scorch, and vulcanization times as ts_2 and t_{90} of lignin filled EPDM samples are shown in Figures 5 to 7, respectively.

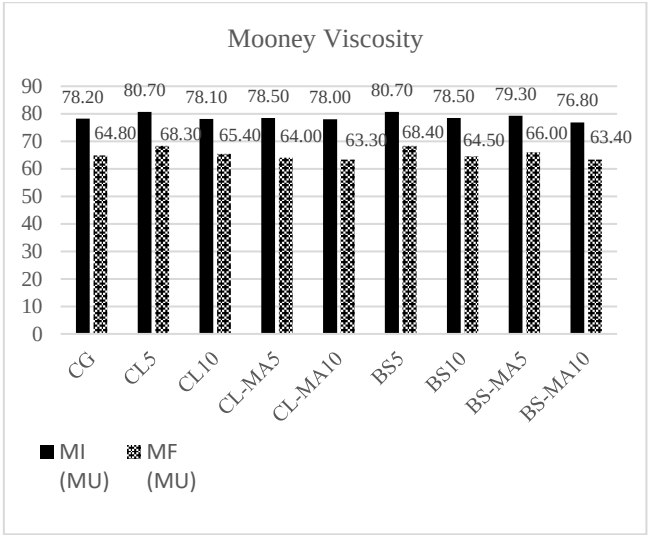


Figure 5. Mooney viscosity values of lignin filled EPDM

The initial viscosity value which is known as MI and the final viscosity value known as MF are given in Figure 5. Adding lignin caused an insignificant increase in the viscosity, except for CL-MA10 and BS5.

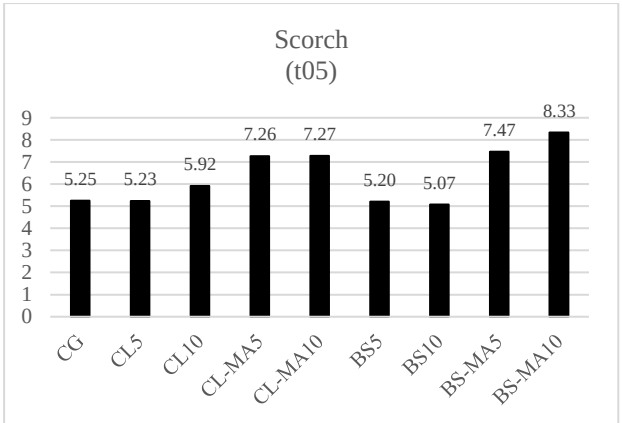


Figure 6. Mooney scorch values of lignin filled EPDM

As shown in Figure 6, lignin addition had no significant effect on the Mooney scorch of EPDM rubber. However, preparing the plates with the maleic-anhydride-modified lignin increased the scorch values. This can be attributed to the reduced molecular motion of modified lignin and the presence of stronger EPDM-lignin interaction. Therefore, the torque values required for the vulcanization process will decrease and lower forces will be needed to rotate the rotor [33].

Figure 7 shows that adding lignin did not cause a change on vulcanization times known as ts_2 and t_{90}. An increase is seen in vulcanization times in modified black solution lignin. This can be attributed to the fact that the modified lignin acts as an activating agent to reduce the burning time and to reduce adhesion and chain mobility in the matrices. This also means a faster heat transfer due to the homogeneous lignin distribution [25]. However, rheological results show that any change in process conditions necessary during the production of EPDM rubber with lignin filling.

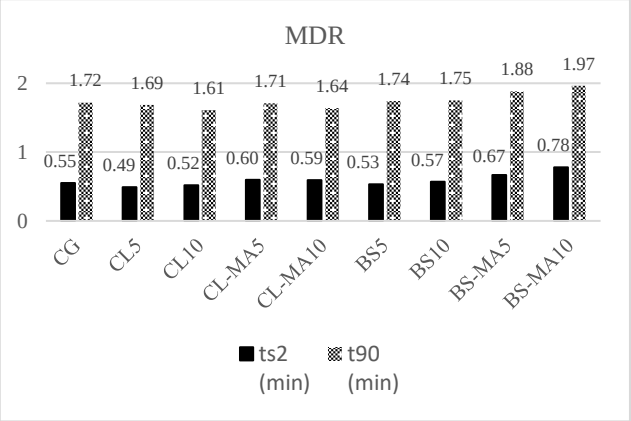


Figure 7. Vulcanization times of lignin filled EPDM

3.4 Deformation properties

Permanent set values of the deformation properties are important in the rubber industry. Permanent set values for the rubber are shown in Figure 8. Adding lignin caused a small increase in permanent deformation values. Therefore, overall, it can be said that lignin has influenced positively on the permanent set values.

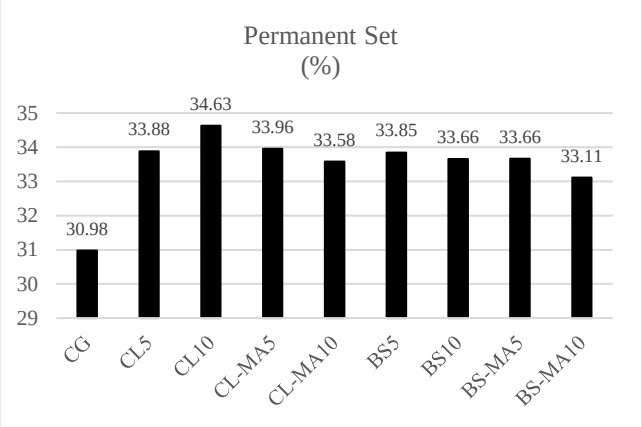
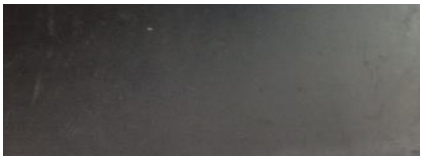


Figure 8. Permanent set values of lignin filled EPDM

3.5 Artificial weathering test

The lignin filled EPDM samples were climated for 250 h in the artificial weathering machine and were controlled visually after aging. As shown in Table 2, there are no stains, no cracks, or no color changes on the surfaces of samples prepared by adding commercial lignin, while there are color changes on the surfaces of EPDM plates without lignin. It can be said that commercial lignin with or without modification increased ultraviolet or weathering resistance of the EPDM plates. In contrast, the black solution made the surfaces worse and caused staining on the surfaces of the EPDM plates. However, if the black solution was modified with maleic anhydride, it increased the resistance of the EPDM rubber against ultraviolet and weathering.

Table 2. Visually controls after 250h weathering

EPDM Plate	250 h of Kalahari Aging
CG	
CL5	
CL10	
CL-MA5	
CL-MA10	
BS5	
BS10	
BS-MA5	
BS-MA10	

3.6 SEM analysis

The SEM pictures taken of the EPDM plates prepared by the addition of lignin are shown in Figure 9. Lignin fillers except for modified black solution were homogeneously dispersed in the EPDM rubber, and no considerable difference is observed with increasing amounts of it. The white particles seen on the surfaces of the EPDM plates shown in Figure 9a to 9d were white fillers such as $CaCO_3$ and SiO_2, which were added in amounts of 25 phr and 20 phr, respectively. Agglomeration, cracking, individual fibrils, and voids were not seen in the SEM photos. This result means that lignin did not chemically degrade in the EPDM matrix. However, as shown in the surface of the EPDM plate in Figure 9e, black solution lignin modified by maleic anhydride caused chemical degradation in the EPDM matrix. The SEM photo of it has been enlarged 2 times to aid in interpreting what happened. Maleic anhydride migrated to the surface after ultraviolet irradiation because of high impurity.

The samples were burned to collect the ash which was analyzed with EDX. Major components of the ash were oxygen (O), sulfur (S), calcium (Ca), and zinc (Zn) as seen in Table 3. The atomic percents of sulfur, calcium, and zinc were very similar for each plate samples. The observed calcium indicates that the EPDM article was reinforced with calcium carbonate ($CaCO_3$) as well as carbon black. The observation of sulfur and zinc means that the EPDM article had a sulfur cure system. Sulfur came from the curatives such as cure accelerators and sulfur, while zinc came from zinc oxide. Zinc oxide was used as a cure activator along with fatty acids such as stearic acid in sulfur-cured rubber composites.

Table 3. Atomic percents of EPDM samples.

EPDM Plate	Karbon (C)	Oksijen (O)	Silisyum (Si)	Kükürt (S)	Kalsiyum (Ca)	Çinko (Zn)
1	83.63	5.24	3.14	1.53	4.7	1.76
2	84.14	5.38	3.18	1.46	4.58	1.26
3	84.39	5.2	2.94	1.33	4.5	1.63
4	86.03	4.44	2.52	1.31	3.94	1.76
5	83.59	5.38	3.21	1.5	4.81	1.51
6	83.9	5.29	2.98	1.28	4.77	1.78
7	84	5.27	2.98	1.52	4.56	1.67
8	83.08	5.5	2.96	1.61	4.63	2.22
9	82.03	7.19	2.93	1.56	4.36	1.92

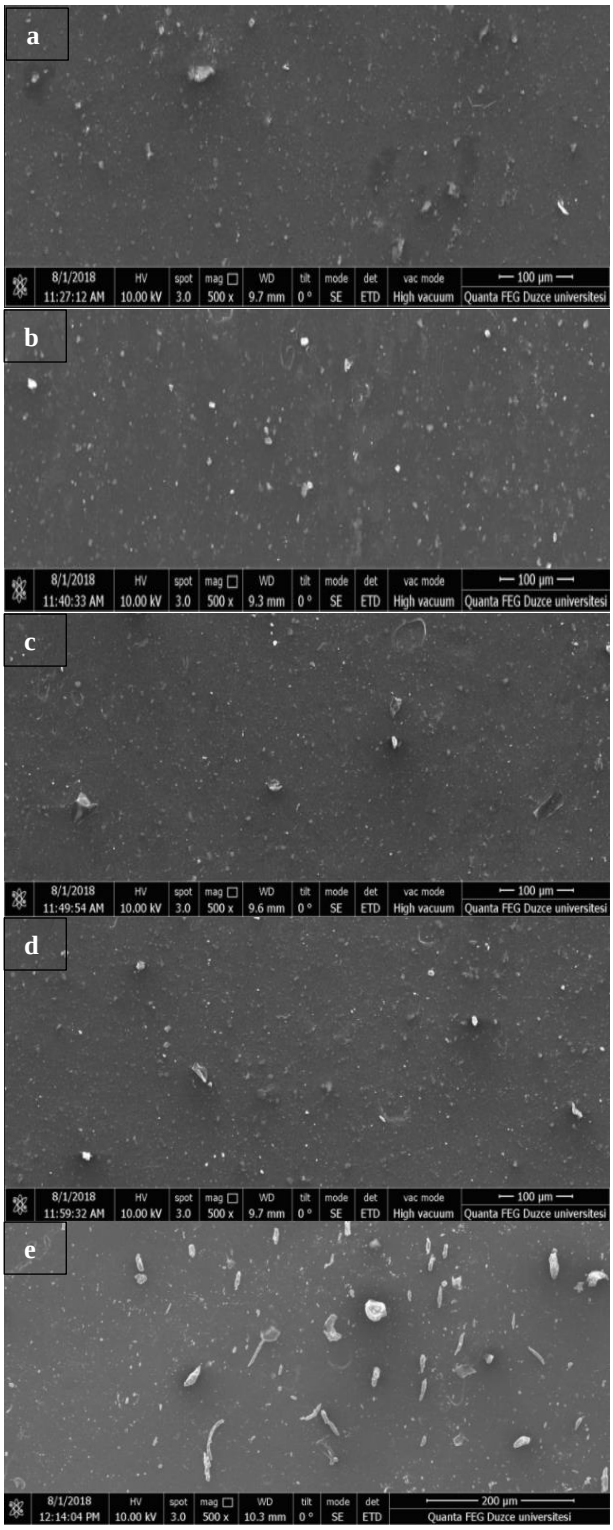


Figure 9. SEM images of (a) EPDM plate, (b) EPDM-L2 plate, (c) EPDM-L4 plate, (d) EPDM-L6 plate, and (e) EPDM-L8 plate

4 Conclusions

Lignin was investigated in detailed as a filler instead of carbon black for EPDM rubber. The lignin made the EPDM more elastic and more resistant by increasing the tear strength and elongation at break values. The commercial lignin type and modification of lignin with maleic anhydride were more effective at enhancing the mechanical properties of the EPDM. After adding the lignin to EPDM rubber, it could be vulcanized with the same process conditions. However, modification of lignin caused slower production, according to the rheological results. Commercial lignin made the EPDM more resistant to ultraviolet and weathering conditions, while the black solution without modification made it less resistant than that of carbon black. Lignin, except for the modified black solution, does not chemically degrade in the EPDM matrix. While lignin improves the mechanical properties of EPDM rubber compounds compared to carbon black, it does not cause any change in process conditions. This result means that lignin can be used as a filler in EPDM rubber instead of carbon black. Thus, petroleum-based materials can be replaced by biodegradable materials with further studies.

Acknowledgements

The author wish to thank the Standard Profile Corporation, Turkey, for technical support and collaborative partnership.

Conflict of Interest

The author declare that they have no conflict of interest.

Similarity Rate (iThenticate): 19 %

References

[1] M. S. C. Kumar and M. Alagar, Development and characterisation of vinyloxyaminosilane grafted ethylene-propylene-diene terpolymer (EPDM-g-VOS) for engineering applications. European Polymer Journal, 38 (10), 2023-2031, 2002. https://doi.org/10.1016/S0014-3057(02)00087-3.

[2] S. J. Ahmedi, Y. D. Huang and W. Li, Clay-polymer nanocomposites: Preparation, properties, future applications and new synthesis approach of EPDM/clay nanocomposites. Journal of Harbin Institute of Technology, 11, 138-145, 2004.

[3] J. Jow, L. Gross, A. Mendelsohn, M. Aarts, and J. Kjellqvist, Overview of insulating materials system for power cable applications. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics, Toulouse, France, 398-402, 2004. https://doi.org/10.1109/ICSD.2004.1350375.

[4] D. M. Stelescu, A. Airinei, M. Homocianu, N. Fifere, D. Timpu and M. Aflori, Structural characteristics of some high density polyethylene/EPDM blends. Polymer Testing, 32 (2), 187-196, 2013. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2012.10.010.

[5] H. Chung and N. R. Washburn, Chemistry of lignin-based materials. Green Materials, 1 (3), 137-160, 2013. https://doi.org/10.1680/gmat.12.00009.

[6] P. Priyodip, S. Balaji and M. V. Kini, Physio-chemico-thermo-mechanical properties of selected biodegradable polymers. Green Materials, 1 (3), 191-200, 2013. https://doi.org/10.1680/gmat.12.00017.

[7] U. Vainio, N. Maximova, B. Hortling, J. Laine, P. Stenius, L. K. Simola, J. Gravitis and R. Serimaa, Morphology of dry lignins and size and shape of dissolved kraft lignin particles by X-ray scattering. Langmuir, 20 (22), 9736-9744, 2004. https://doi.org/10.1021/la048407v.

[8] M. Sotenko, S. R. Coles, I. McEwen, R. DeCampos, G. Barker and K. Kirwan, Biodegradation as natural fibre pre-treatment in composite manufacturing. Green Materials, 4 (1), 8-17, 2016. https://doi.org/10.1680/jgrma.15.00025.

[9] M. A. De Paoli and L. T. Furlan, Sugar cane bagasse-lignin as photo-stabilizer for butadiene rubber. Polymer Degradation and Stability, 11 (4), 327-337, 1985. https://doi.org/10.1016/0141-3910(85)90036-9.

[10] L. R. C. Barclay, F. Xi and J. Q. Norris, Antioxidant properties of phenolic lignin model compounds. Journal of Wood Chemistry and Technology, 17 (1-2), 73-90, 1997. https://doi.org/10.1080/02773819708003119.

[11] C. Pouteau, P. Dole, B. Cathala, L. Averous and N. Boquillon, Antioxidant properties of lignin in polypropylene. Polymer Degradation and Stability, 81 (1), 9-18, 2003. https://doi.org/10.1016/S0141-3910(03)00057-0.

[12] C. G. Boeriu, D. Bravo, R. J. A. Gosselink and J. E. G. van Dam, Characterisation of structure-dependent functional properties of lignin with infrared spectroscopy. Industrial Crops and Products, 20 (2), 205-218, 2004. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2004.04.022.

[13] T. R. Griffith and D. W. MacGregor, Aids in vulcanization of lignin–natural rubber coprecipitates. Industrial & Engineering Chemistry, 45 (2), 380-386, 1953. https://doi.org/10.1021/ie50518a039.

[14] M. G. Kumaran and S. K. De, Utilization of lignins in rubber compounding. Journal of Applied Polymer Science, 22 (7), 1885-1893, 1978. https://doi.org/10.1002/app.1978.070220711.

[15] D. K. Setua, M. K. Shukla, V. Nigam, H. Singh and G. N. Mathur, Lignin reinforced rubber composites. Polymer Composites, 21 (6), 988-995, 2000. https://doi.org/10.1002/pc.10252.

[16] G. P. Mendis, S. G. Weiss, M. Korey, C. R. Boardman, M. Dietenberger, J. P. Youngblood and J. A. Howarter, Phosphorylated lignin as a halogen-free flame retardant additive for epoxy composites. Green Materials, 4 (4), 150-159, 2016. https://doi.org/10.1680/jgrma.16.00008.

[17] J. B. Doughty and S. C. Charleston, Lignin reinforced rubber and method of preparation thereof. U. S. Patent 3, 247,135, 19 April 1966.

[18] J. B. Doughty, Method of dry-milling carboxylic elastomers and alkali lignins. U. S. Patent 3, 325,427, 13 June 1967.
[19] M. J. G. Davidson and R. H. Wunder, Latex coagulation process using lignin compound. U. S. Patent 4, 025,711, 24 May 1977.
[20] S. P. Boutsicaris, Lignin reinforced synthetic rubber. U. S. Patent 4, 477,612, 16 October 1984.
[21] D. A. Benko, B. R. Hahn and et al., Functionalized lignin, rubber containing functionalized lignin and products containing such rubber composition. U. S. Patent 8, 664,305, 4 March 2014.
[22] G. Xu, G. Yan and J. Zhang, Lignin as coupling agent in EPDM rubber: thermal and mechanical properties. Polymer Bulletin, 72, 2389–2398, 2015. https://doi.org/10.1007/s00289-015-1411
[23] H. Kandil, A. M. Youssef and D. E. E. Nashar, Lignin as a dry bonding system component in EPDM/microcrystalline cellulose composites. Journal of Applied Polymer Science, 139, 1-11, 2022. https://doi.org/ 10.1002/app.51616.
[24] P. Feng, J. Lei, J. Mei, W. Liu and H. Wang, Effect of lignin on the structure-property behavior of metal-coordinated and chemically crosslinked ethylene-propylene-diene-monomer composites. International Journal of Biological Macromolecules, 271, 1-10, 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132276.
[25] B. Poyraz, Y. Guner, A. Tozluoglu and R. Arslan, Cellulose and lignin in place of EPDM and carbon black for automotive sealing profiles. International Journal of Biological Macromolecules, 236, 1–8, 2023. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123964.
[26] Z. Hu, X. Du, J. Liu, H. Chang and H. Jameel, Structural Characterization of Pine Kraft Lignin: Biochoice Lignin vs Indulin At. Journal of Wood Chemistry and Technology, 36, 432-446, 2016. https://doi.org/ 10.1080/02773813.2016.1214732.
[27] S.S. Sarkawi and Y. Aziz, Ground rice husk as filler in rubber compounding. J. Teknol. Keluaran Khas. Dis., 39 (A), 135–148, 2003. https://doi.org/10.11113/jt.v39.435.
[28] H. Nabil, H. Ismail and A. R. Azura, Compounding, mechanical and morphological properties of carbon-black filled natural/recycled ethylene-propylene-diene monomer blends. Polymer Testing, 32, 385–393, 2013. https://doi.org/10.1016/j. polymertesting.2012.11.003.
[29] W. M. Goldmann, J. Ahola, M. Mikola and J. Tanskanen, Solubility and fractionation of Indulin AT kraft lignin in ethanol-water media. Separation and Purification Technology, 209, 826-832, 2019. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.06.054.
[30] L. Mathew and R. Joseph, Mechanical properties of short-ısora-fiber reinforced natural rubber composites: effects of fiber length, orientation, and loading: alkali treatment, and bonding agent. Journal of Applied Polymer Science, 103, 1640–1650, 2007. https://doi.org/10.1002/app.25065.
[31] N. Sun, M. Di and Y. Liu, Lignin-containing polyurethane elastomers with enhanced mechanical properties via hydrogen bond interactions. International Journal of Biological Macromolecules, 184, 1–8, 2021. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.06.038.
[32] N.S. Che Mat, H. Ismail and N. Othman, Curing characteristics and tear properties of bentonite filled ethylene propylene diene (EPDM) rubber composites. Procedia Chemistry, 19, 394–400, 2016. https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.03.029.
[33] H. Ismail, M. Edyham and B. Wirjosentono, Fibre filled natural rubber composites: the effects of filler loading and bonding agent. Polymer Testing 21 (2), 139–144, 2002. https://doi.org/10.1016/S0142-9418(01)00060-5.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 965-973

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Investigation of genetically-optimized pixel monopole patch antennas for miniaturization and wideband applications

Minyatürleştirme ve geniş bant çalışmaları için genetik olarak optimize edilmiş piksel monopol yama antenlerin incelemesi

Çağatay Aydın[1,*]

Ege Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 35100, İzmir Türkiye

Abstract

A pixel-based synthesis method driven by a genetic algorithm is applied to a rectangular monopole-patch antenna on FR-4. A 7x13 grid with 5 mm x 5 mm pixels is optimized with a single $|S_{11}|$ objective to realize two contrasting designs: a miniaturized antenna that shifts resonance from 3.5 GHz to 1 GHz while reducing the linear size by 65%, and a wideband antenna that maintains $|S_{11}| \leq -10$ dB across 1.9-6 GHz. Full-wave CST simulations validate both cases without altering substrate or feed. The miniaturized version is bandwidth-limited, whereas the wideband version exhibits radiation-pattern variation—shortcomings that stem from the deliberately simple cost function. Results confirm the versatility of pixel antennas and indicate that multi-objective or machine-learning-assisted optimization can further enhance performance.

Keywords: Pixel antenna, Antenna optimization, Genetic algorithm, Miniaturization, Wideband monopole

Öz

Bu çalışmada, FR-4 üzerinde dikdörtgen monopole-yama antene genetik algoritma destekli piksel tabanlı bir tasarım yöntemi uygulanmıştır. 5 mm x 5 mm boyutlu pikseller ile 7x13 olarak pikselleştirilmiş yapı, yalnızca $|S_{11}|$'e bağlı optimize edilerek iki farklı tasarım elde edilmiştir: rezonansı 3.5 GHz'ten 1 GHz'e kaydırarak boyutu doğrusal olarak %65 azaltan minyatür anten ve 1.9-6 GHz aralığında $|S_{11}| \leq -10$ dB sağlayan geniş bant anten. Her iki tasarım da besleme veya substrat değiştirmeden tam dalga CST benzetimleriyle doğrulanmıştır. Basit maliyet fonksiyonuna bağlı olarak mini anten dar bant genişliği, geniş bant anten ise desen değişkenliği göstermektedir. Sonuçlar piksel anten yaklaşımının esnekliğini gösterirken, çoklu hedefli veya makine öğrenmesi destekli optimizasyonlarla performansın daha da iyileştirilebileceği görülebilir.

Anahtar kelimeler: Piksel anten, Anten optimizasyonu, Genetik algoritma, Minyatürizasyon, Geniş bant monopol

1 Introduction

The continuous advance of wireless communication systems demands antenna solutions that are both compact and capable of operating over wide or multiple frequency bands [1], [2]. Seamless integration into devices such as mobile terminals and IoT sensors, wearable electronics face the challenge of miniaturization [3], [4]. At the same time, support for diverse standards such as 5G, WLAN and Bluetooth requires antennas with broad or reconfigurable frequency coverage [2], [5]. Although planar monopole antennas are inherently low profile and can offer appreciable bandwidth [6], achieving simultaneous wideband performance and pronounced size reduction remains difficult [1], [4].

Conventional miniaturization techniques, for example loading the radiator with high-permittivity substrates or introducing meanders, slots and defected-ground structures (DGS) [2], [6], [7], seek to lengthen the electrical path within a restricted physical volume. Classical wideband strategies, in turn, reshape the antenna element and ground plane or employ specialized feeding arrangements [1]. While successful, these approaches often involve design trade-offs and may lack the flexibility needed to satisfy multifunctional requirements.

Pixel antennas offer a highly adaptable alternative. In this concept the radiating surface is discretized into an array of "pixels", each of which may be metallic or non-metallic (or switch-controlled) [8-10]. By selecting the pixel states, the effective geometry and current distribution can be reshaped in order to tailor resonant frequency, bandwidth, radiation pattern or polarization [8], [11–14].

This versatility is particularly advantageous for miniaturization: optimization algorithms can identify pixel configurations that lower the fundamental resonance without enlarging the footprint. Using a 10x10 pixel grid, Lamsalli et al. [10] achieved an 82% size reduction, shifting the resonance from 4.9 GHz to 2.16 GHz. The same principle can be exploited to obtain wideband behavior, as optimized pixel arrangements are able to excite multiple resonant modes and create complex current paths [14], [15]. For instance, in [14], a low-profile pixel antenna with more than 40% bandwidth in the L-band is reported, while stacked pixelated layers have been proposed for dual-band IoT applications [5].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: cagatay.aydin@ege.edu.tr (Ç. Aydın)
Geliş / Received: 19.04.2025 Kabul / Accepted: 14.05.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1679692

Because the number of possible pixel combinations grows exponentially with grid size, computational optimization is indispensable [15], [16]. Evolutionary algorithms (EAs) are widely adopted [17]: genetic algorithms (GAs) have been used for frequency reconfiguration, pattern steering and miniaturization [10], [11], [18], and binary particle-swarm optimization (BPSO) has been adapted to the discrete pixel topology [5]. More advanced techniques include successive Boolean optimization (SEBO) [11], N-port characteristic-mode-analysis-driven searches [15], adjoint-method optimizers such as the Method of Moving Asymptotes (MMA) [9], and machine-learning-assisted schemes based on convolutional or reinforcement-learning models [13], [19]-[21].

This paper demonstrates the application and versatility of the pixel antenna approach using a systematic design methodology to enhance monopole antenna performance. The work aims for two distinct design objectives using the same initial rectangular monopole patch geometry and fundamental $|S_{11}|$-based cost function: the first being substantial miniaturization for operation near 1 GHz and the second being wideband operation covering 2–6 GHz. The pixel configurations are optimized using a GA, selected for its demonstrated effectiveness in miniaturization tasks [10]. Full-wave electromagnetic simulations are employed to evaluate the resulting antenna geometries. The results presented illustrate that this consistent methodology can successfully yield designs addressing both miniaturization and wideband impedance matching requirements, albeit with performance limitations (such as bandwidth restriction in the miniaturized case and pattern instability in the wideband case) directly attributable to the simplicity of the chosen cost function. This underscores the flexibility of the pixel approach and highlights the critical role of the objective function in achieving fully optimized, application-specific performance.

2 A systematic methodology for pixel-based antenna design and optimization

In this section, two examples will be shown for miniaturization application and wideband application by utilizing pixel antenna approach. But before these examples, the design procedure should be explained.

2.1 Initial monopole geometry and dimensional analysis

A rectangular monopole patch antenna was selected to implement the pixel antenna approach for simplicity. The 0.7-6 GHz frequency range was chosen because it covers many widely used wireless applications, including GSM 1, GSM 2, 3G, LTE, 5G, Wi-Fi, Wi-Max and Bluetooth. The rectangular monopole patch antenna was designed on loss free FR4 ($\varepsilon_r = 4.3$, thickness 1.6 mm) due to its low cost. For the simulations, the FR4 was initially modeled as lossless to focus on the geometric optimization effects.

In the first step, 3.5 GHz was chosen as the center frequency for the rectangular patch antenna, as it approximately represents the arithmetic mean of the target frequency range. The equations needed to determine the dimensions of the rectangular patch antenna are available in the literature [22], [23]. The calculated width and length were 26 mm x 20 mm, respectively, for the specified center frequency.

In the following step, the rectangular patch antenna was transformed into a monopole structure to achieve a wide frequency range. For this purpose, the ground plane was designed to be 3 mm shorter than the feed line. Therefore, the dimensions for the reference antenna are provided in Table 1, and the antenna geometry along with its simulation results are presented in Figure 1 and Figure 2, respectively. The substrate dimensions were chosen to be 70 mm x 70 mm (WSUB x LSUB). The initial antenna was simulated using CST MWS.

Tablo 1. Dimensions of the initial rectangular monopole patch antenna ($in\ mm$)

WA	LA	WF	LF	WGND	LGND
26	20	1.5	31	70	28

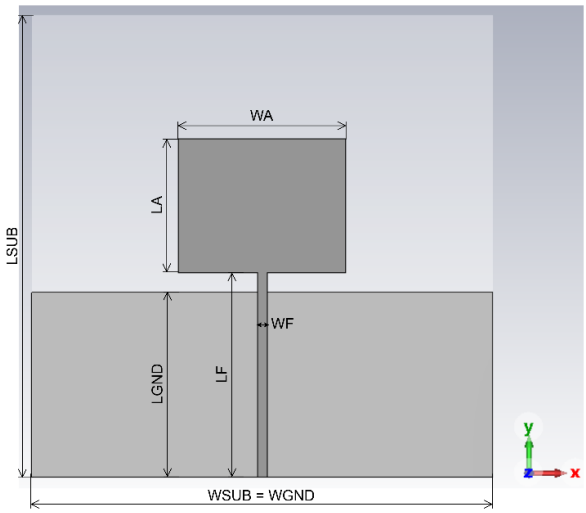
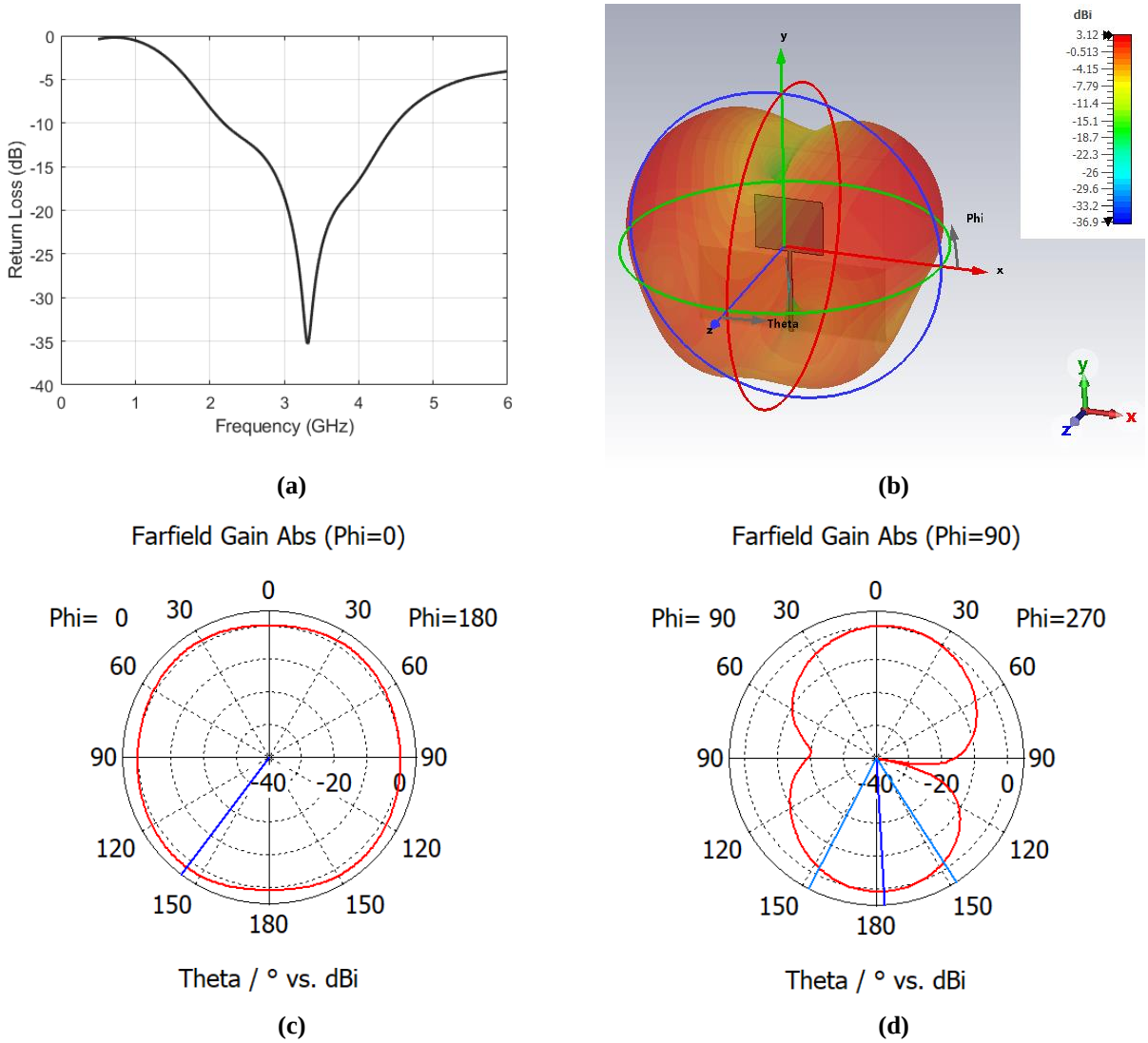


Figure 1. Geometry of initial rectangular monopole patch antenna

At this stage, the procedure requires finalizing the antenna dimensions for both miniaturization process and wideband performance which should be achieved separately, as previously discussed. As illustrated in Figure 2(a), the initial design already supports wide frequency operation; however, achieving lower frequencies in the target range becomes challenging under realistic miniaturization constraints. For example, designing a patch antenna at 1 GHz would necessitate dimensions of approximately 90 mm x 90 mm. Therefore, more moderate dimensions should be selected to simplify the optimization process and cover the 0.7-1 GHz band. Consequently, the width of 65 mm and the length of 35 mm were chosen for the final antenna, while the other parameters specified in Table 1 remain unchanged as depicted in Figure 3.

Since the final design has already been established, the next step is to apply the pixel approach by utilizing an appropriate optimization procedure. The details of this process will be discussed in the following section.



(a) **(b)** **(c)** **(d)**

Figure 2. Simulation results of initial rectangular monopole patch antenna: **(a)** Return loss (dB), **(b)** 3D polar plot (Gain) at 3.5 GHz, **(c)** Radiation pattern (E-Plane) at 3.5 GHz., **(d)** Radiation pattern (H-plane) at 3.5 GHz.

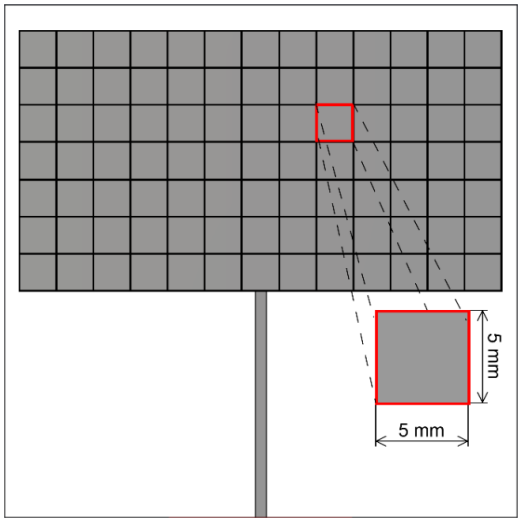


Figure 3. Pixelated geometry of final rectangular monopole patch antenna with $65mm \times 35mm$ dimension

2.2 Optimization procedure utilizing the pixel approach

In the introduction, we briefly noted that many studies employ standard optimization methods such as GA, particle swarm optimization (PSO), and differential evolution (DE in addition to developing novel, more efficient algorithms. However, the primary objective of this manuscript is to investigate the versatility of pixel antennas for a range of applications. Therefore, one of the most widely used optimization methods, the GA, was selected for this work.

Although CST was used to verify the designed antennas, the GA optimization routine with default settings was executed in MATLAB, a common practice for such applications. A brief outline of this routine is provided below with the corresponding flowchart is depicted in Figure 4:

- A pixel value of "1" indicates metal presence, while "0" indicates the absence of metal.
- The antenna geometry is divided into pixels, forming a matrix of "1"s and "0"s.

- This matrix is used to generate the antenna geometry, which is then exported to CST.
- CST simulates the antenna geometry and returns the results to MATLAB.
- A cost value is calculated in MATLAB based on specified parameters and the target frequency range.
- New generations are created, and these steps are repeated until the optimization routine terminates.

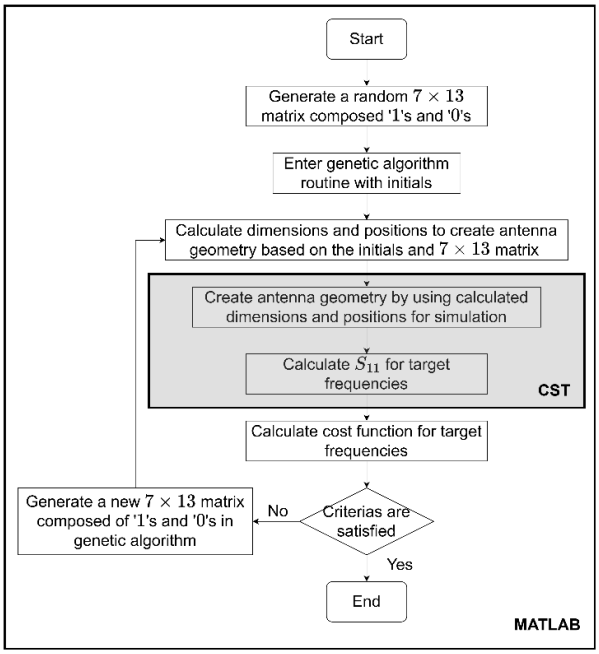


Figure 4. Flowchart of optimization routine involving MATLAB and CST interaction.

In this study, each pixel measures 5 mm x 5 mm, corresponding to a 7x13 matrix with a total of 91 pixels. At the maximum target frequency of 6 GHz, this dimension is approximately $\lambda/10$, which can be considered a moderate size. Larger pixel dimensions might reduce the likelihood of meeting the desired cost criteria or significantly increase computation time. The suitability of this pixel size will be discussed in the following section.

Reference [10], proposes the following cost function,

$$cost = \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} Q(f_i) \right| \tag{1}$$

where,

$$Q(f_i) = \begin{cases} |S_{11}(f_i)|, & for\ S_{11} \geq -10\ dB \\ +10\ dB, & for\ S_{11} \leq -10\ dB \end{cases}$$

Equation (1) is a fundamental equation used to calculate the cost function. In this equation, f_i is denoting the target frequencies and N is the total number of target frequencies. The reason for choosing this equation is to demonstrate that pixel antennas can be adapted to a variety of applications with minimal effort, as previously mentioned. It is also evident that a more complex or tailored cost function for a specific application could facilitate reaching the desired goals more efficiently.

It should be noted that the effect of a pixelated ground plane was intentionally excluded from this study. Although such structures such as defected ground structures [2] are known to improve size reduction or bandwidth performance, including them would require more complex analysis. This could shift the focus of the study toward additional parameters such as coupling, which are beyond the intended scope for this manuscript.

This section introduced the fundamental aspects of the proposed methodology. The pixel-based approach for defining the antenna geometry, allowing for a diverse range of configurations, was presented. The GA-based optimization framework was also described, highlighting the integration between MATLAB for cost function calculation and CST Microwave Studio for electromagnetic analysis and final performance verification. The next section presents examples of this methodology and discusses their results.

3 Simulation results and discussion

In order to demonstrate the versatility inherent in the pixel antenna approach, two primary design objectives as mentioned earlier will be covered: miniaturization and wideband operation. Both optimization scenarios utilize the identical baseline antenna geometry, pixel count, and pixel size (Figure 3), as well as the same cost function (Equation (1)). The simulation results obtained for each case will be presented and discussed in the context of these constraints, evaluating the extent to which the target performance values were achieved.

3.1 Case I: Miniaturization

The miniaturization objective targeted the 0.7-1 GHz frequency range. For context, conventional rectangular patch antennas operating at these frequencies would require significant physical dimensions (approximately 130 mm x 100 mm at 0.7 GHz and 90 mm x 70 mm at 1 GHz). In contrast, our approach applied GA-based optimization to the predefined pixelated structure described previously. Figure 5 presents the simulated return loss characteristics for three of the best-performing pixel configurations obtained by the GA optimization. The simulation results show that while satisfactory operation was achieved near the upper edge of the band (around 1 GHz), the performance requirement was not met across the entire target range. Potential factors contributing to this limitation may include the size of the pixels or the simplicity of the cost function (Equation (1)) used for this application. It is acknowledged that achieving broadband impedance matching in electrically small antennas is inherently challenging due to Chu limit [23]; advanced optimization strategies incorporating machine learning techniques [13], [18], [19] or more complex, tailored cost functions are actively researched areas that could potentially enhance performance for such demanding requirements.

Figure 6 depicts the geometries resulting from three of the best-performing configurations obtained from the GA-based optimization. Inspection of these pixel arrangements

indicates that the optimization algorithm tends to form structures that effectively increase the electrical path length of the surface currents. This strategy is consistent with achieving resonance at lower target frequencies within the fixed antenna footprint. In addition, Figure 6 also presents the simulated radiation patterns for these designs at 1 GHz.

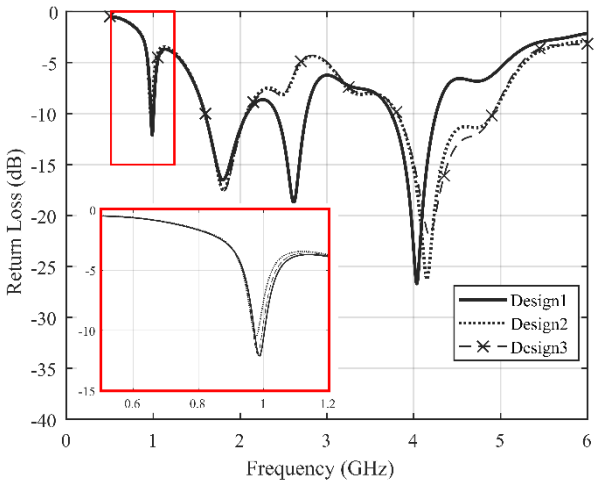


Figure 5. Return loss (dB) plot of three of best designs for Case I.

Due to the overall similarity in the optimized geometries, the radiation patterns exhibit no differences. The simulated maximum gain for these configurations is approximately 1.8 dBi. Furthermore, the figure includes the surface current distributions, visualized using a 0-100 A/m linear scale. While slight variations in maximum of current magnitude exist between the designs, the overall distribution consistently highlights the dominant current paths established by the pixel optimization.

Regarding the radiation patterns, it is observed that for these GA-optimized miniaturized designs (Figure 6), the Phi=90° plane tends to exhibit the most omnidirectional-like characteristic. For the initial rectangular monopole patch antenna, its H-plane (Figure 2(d), Phi=90°) displays the expected broadly omnidirectional behavior, while the E-plane (Figure 2(c), Phi=0°), especially with a limited display scale in its original presentation, can appear more directional, as is typical for monopoles in that principal plane. The differences in radiation pattern characteristics, including the apparent orientation of the most omnidirectional plane for the miniaturized antennas, are a direct consequence of the pixel-based optimization. The GA modifies the antenna geometry to achieve miniaturization by creating complex current paths, which fundamentally alters the radiation mechanism compared to the simpler initial structure.

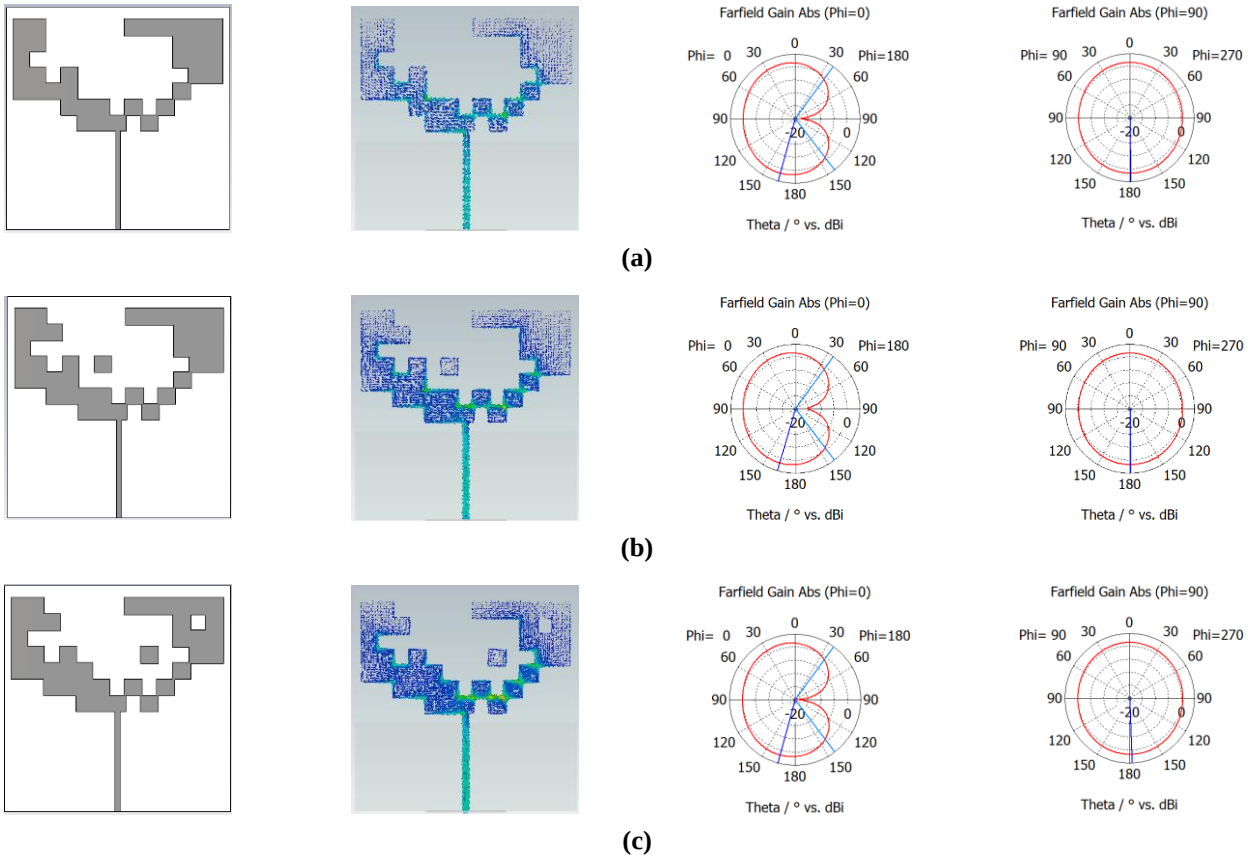


Figure 6. Antenna geometries and corresponding distribution of surface current plots and radiation patterns (E- and H-Plane), respectively at 1 GHz obtained by GA-based optimization for Case I: **(a)** Design1, **(b)** Design2, **(c)** Design3

3.2 *Case II: Wideband operation*

Addressing the second objective, wideband operation, the target frequency range was set from 07.-5.8 GHz. To emphasize the versatility of the pixel approach, the same initial geometry, constraints, and cost function (Equation (1)) utilized for miniaturization were applied here. Figure 7 depicts the simulated return loss results, comparing the initial rectangular monopole antenna with three optimized pixel configurations obtained via GA-based optimization. This comparison clearly shows the significant bandwidth expansion that was achieved. Especially, Design3 exhibits the most promising wideband characteristics, covering the 1.9 GHz to 6 GHz range (and potentially beyond), although it does not meet the matching requirement below 1.9 GHz within the target range. As with the miniaturization case, this limitation might be due to the same factors such as pixel size or the specific cost function employed. Nonetheless, the achieved bandwidth for Design3 indicates considerable potential, suggesting that further improvements are possible with more advanced optimization strategies or refined cost functions.

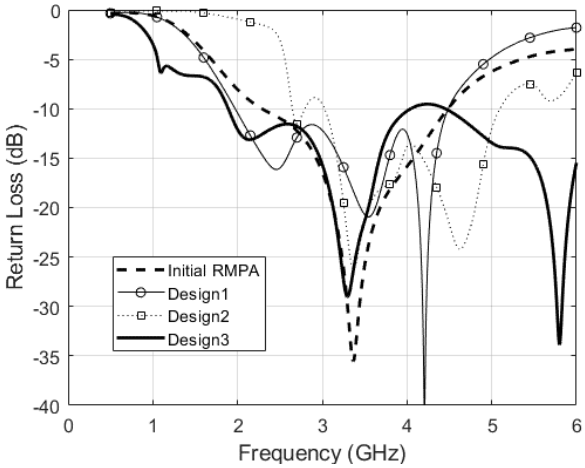


Figure 7. Return loss (dB) plots of antennas designed for Case II.

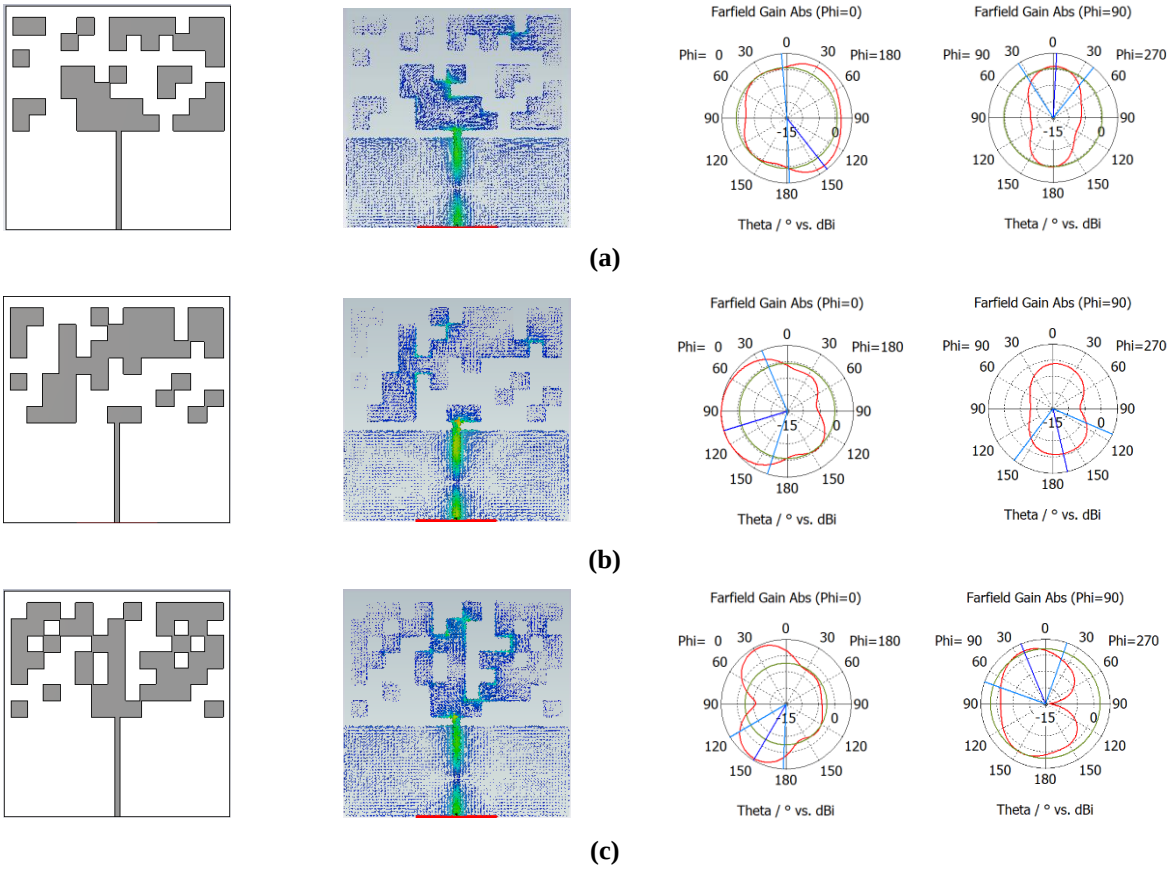


Figure 8. Antenna geometries and corresponding distribution of surface current plots and radiation patterns (E- and H-Plane), respectively at 3.5 GHz obtained by GA-based optimization for Case II: **(a)** Design1, **(b)** Design2, **(c)** Design3.

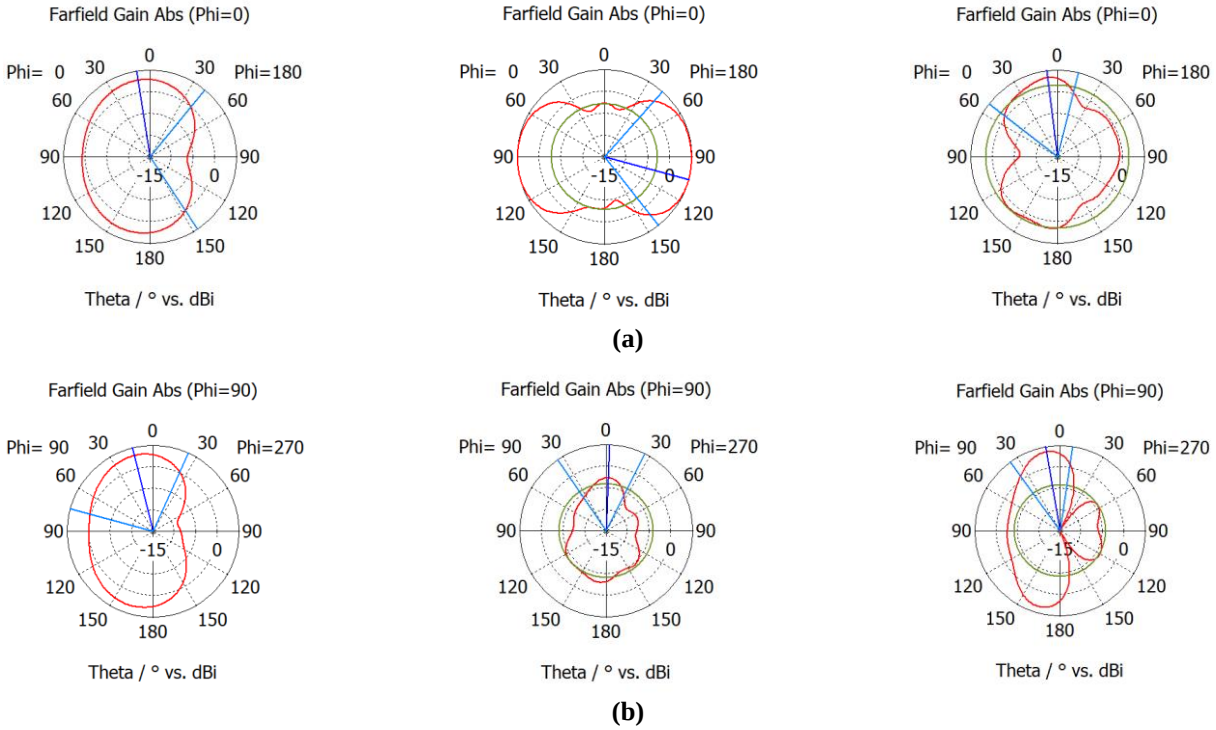


Figure 9. Radiation patterns of Design3 antenna at 2.5 GHz, 4.5 GHz and 5.5 GHz, respectively: **(a)** E-Plane, **(b)** H-Plane.

Figure 8 depicts the geometries for antennas Design1, Design2, and Design3 with their respective radiation patterns simulated at 3.5 GHz. These three designs were specifically chosen from the optimization results meeting the return loss requirement to demonstrate the geometric variety achievable with the pixel approach. As can be seen, although satisfying the primary frequency target, their optimized pixel structures differ considerably. Consequently, each antenna exhibits a distinct radiation pattern due to its unique geometry. This clearly shows the strong relationship between the antenna's structure and its radiation characteristics. It highlights that optimizing solely for target return loss does not guarantee a specific radiation pattern, and incorporating pattern metrics into the cost function would be necessary for many practical applications [6]. For the presented wideband designs, the simulated maximum gain is approximately 5 dBi for each one. The corresponding surface current distributions are also visualized in Figure 8, using a consistent linear scale of 0-40 A/m, further illustrating the different current paths associated with each unique geometry.

An essential characteristic of wideband antennas, beyond expected return loss, is the stability of their radiation patterns across the operational frequency range. Figure 8(c) presents the radiation pattern for Design3 at 3.5 GHz, while Figure 9 illustrates the patterns at additional frequencies such as 2.5 GHz, 4.5 GHz, and 5.5 GHz within its operational band. Comparison across these frequencies reveals significant variations in the radiation pattern's shape and directivity. This indicates that, despite achieving wideband operation (as shown in Figure 7), Design3 lacks the pattern stability often required for practical wideband applications. Such an outcome is directly attributable to the cost function employed (Equation (1)), which solely targeted the minimization of the return loss. Achieving consistent radiation patterns necessitates the inclusion of appropriate pattern stability metrics within the optimization objective function.

4 Conclusion

A single pixel-antenna framework, combined with a GA optimizer, has produced two distinct monopole-patch designs from an identical 7x13 grid: a 65 mm x 35 mm antenna resonating at 1 GHz with almost greater than 65% size reduction, and a wideband variant covering 1.9-6 GHz (≈ 80% fractional bandwidth). These outcomes confirm that pixelation can address divergent specifications such as miniaturization and broadband matching without modifying substrate, feed, or manufacturing process.

The exclusive reliance on a $|S_{11}|$ cost function simplifies implementation but imposes clear limits: reduced bandwidth and gain (1.8 dBi) in the compact case and radiation-pattern instability below 2 GHz in the wideband case. Future studies will therefore adopt multi-objective criteria that include radiation efficiency, pattern stability and, for electrically small antennas, Chu-constrained bandwidth. The effect of a pixelated ground plane will also be investigated, as it may offer additional bandwidth enhancement or size reduction while introducing new design trade-offs. Machine-learning-accelerated surrogate models will also be explored to cut optimization time. Finally, physical prototyping and low-frequency extensions (< 800 MHz) will be studied to demonstrate further size reduction and to validate the simulated results experimentally.

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Similarity (iThenticate): 4%

References

[1] M. A. Ullah, R. Keshavarz, M. Abolhasan, J. Lipman, and N. Shariati, Multiservice compact pixelated stacked antenna with different pixel shapes for IoT applications, IEEE Internet Things Journals, vol. 10, no. 22, pp. 19883–19897, 2023. https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3281816

[2] M. C. Derbal, M. F. Nakmouche, M. Nedil, A. Amma, D. E. Fawzy and M. F. A. Sree, Dual-band antenna design using pixeled DGS for energy-harvesting applications, 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE), pp. 147–150 Antalya, Türkiye, 29-31 Mar. 2022. https://doi.org/10.1109/ICEEE55327.2022.9772605

[3] D. Mair and D. Baumgarten, Evolutionary optimisation of pixelated IFA-inspired antennas, Science Reports, vol. 14, no. 1, Art. no. 26664, Nov. 2024. https://doi.org/10.1038/s41598-024-77695-x

[4] M. Shubbar and B. Rakos, A self-adapting, pixelized planar antenna design for infrared frequencies, Sensors, vol. 22, no. 10, p. 3680, May 2022. https://doi.org/10.3390/s22103680

[5] A C. Suresh, T. S. Reddy, B. T. P. Madhav, S. Alshantri, W. El-Shafai, S. Das and V. Sorathiya, A novel design of spike-shaped miniaturized 4x4 MIMO antenna for wireless UWB network applications using characteristic mode analysis, Micromachines, vol. 14, no. 3, p. 612, Jan. 2023. https://doi.org/10.3390/mi14030612

[6] D. Rodrigo, B. A. Cetiner, and L. Jofre, Frequency, radiation-pattern and polarization-reconfigurable antenna using a parasitic pixel layer, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 62, no. 6, pp. 3422–3427, Jun. 2014. https://doi.org/10.1109/TAP.2014.2314464

[7] J. Jayasinghe, J. Anguera, and D. Uduwawala, On the behavior of several fitness functions for genetically optimized microstrip antennas, International Journal of Scientific World, vol. 3, no. 1, pp. 53–58, Feb. 2015. https://doi.org/10.14419/ijsw.v3i1.4132

[8] T. Qiao, F. Jiang, S. Shen, Z. Zhang, M. Li and C. Y. Chiu, Pixel-antenna optimization using the adjoint method and the method of moving asymptotes, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 71, no. 3, pp. 2873–2878, Mar. 2023. https://doi.org/10.1109/TAP.2023.3240563

[9] S. Song and R. D. Murch, An efficient approach for optimizing frequency-reconfigurable pixel antennas using genetic algorithms, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 62, no. 2, pp. 609–620, Dec. 2013. https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2293509

[10] M. Lamsalli, A. El Hamichi, M. Boussouis, N. A. Touhami, and T. Elhamadi, Genetic-algorithm optimization for microstrip patch antenna miniaturization, Progress in Electromagnetics Research Letters, vol. 60, pp.113–120, 2016. https://doi.org/10.2528/PIERL16041907

[11] S. Shen, Y. Sun, S. Song, D. P. Palomar, and R. D. Murch, Successive Boolean optimization of planar pixel antennas, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 65, no. 2, pp. 920–925, Feb. 2017. https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2634399

[12] F. Jiang, S. Shen, C.-Y. Chiu, Z. Zhang, Y. Zhang, and Q. S. Cheng, Pixel-antenna optimization based on perturbation-sensitivity analysis, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 70, no. 1, pp. 472–486, July. 2021. https://doi.org/10.1109/TAP.2021.3097104

[13] Q. Wu, W. Chen, C. Yu, H. Wang, and W. Hong, Machine-learning-assisted optimization for antenna-geometry design, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 72, no. 3, pp. 2083–2095, Jan. 2024. https://doi.org/10.1109/TAP.2023.3346493

[14] M. Rammal, M. Majed, E. Arnaud, J. Andrieu, and B. Jecko, Small-size wide-band low-profile “pixel antenna”: Comparison of theoretical and experimental results in L-band, International Journal of Antennas and Propagation, vol. 2019, no. 1, 2019. https://doi.org/10.1155/2019/3653270

[15] F. Jiang, C.-Y. Chiu, S. Shen, Q. S. Cheng, and R. Murch, Pixel-antenna optimization using N-port characteristic-mode analysis IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 68, no. 5, pp. 3336–3347, Jan. 2020. https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2963588

[16] J. W. Jayasinghe, Application of genetic algorithm for binary optimization of microstrip antennas: A review, AIMS Electronics and Electrical Engineering, vol. 5, no. 4, pp. 315-333, 2021. https://doi.org/10.3934/electreng.2021016

[17] S. K. Goudos, Optimization of antenna design problems using binary differential evolution, in Handbook of Research on Emergent Applications of Optimization Algorithms, Business Science Reference, IGI Global, pp. 614-636, Jan. 2018. https://doi.org/10.4018/978-1-5225-2990-3.ch026

[18] H. Chen, Z. Wu, S. Li, X. Li, and Q. Liu, Proximal policy optimization reinforcement learning assisted patch antenna design, in Proc. IEEE 12th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), Bali, Indonesia, 22-25 Jul. 2024. https://doi.org/10.1109/APCAP2011.2024.10881019

[19] Q. Wang, Z. Pang, D. Gao, P. Liu, X. Pang and X. Yin, Machine-learning-assisted quasi-bisection method for pixelated patch-antenna bandwidth optimization, IEEE Antennas Wireless Propagation Letters, vol. 23, no. 12, pp. 4807–4811, Dec. 2024. https://doi.org/10.1109/LAWP.2024.3475628

[20] S. Goudos, Antenna design using binary differential evolution: Application to discrete-valued design problems, IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 59, no. 1, pp. 74–93, Feb. 2017. https://doi.org/10.1109/MAP.2016.2630041

[21] C. A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design 3rd ed., New York, USA: Wiley, 2005.
[22] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, Antenna Theory and Design, 3rd ed., Wiley, 2012.
[23] L. J. Chu, Physical limitations of omni-directional antennas, Journal of Applied Physics, vol. 19, pp. 1163–1175, 1948. https://doi.org/10.1063/1.1715038

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 974-980

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Safety distance control approach in moving block signaling systems

Hareketli blok sinyalizasyon sistemlerinde emniyet mesafesi kontrolü yaklaşımı

Ertuğrul Ateş[1,*], İlker Üstoğlu[2]

[1] *Niğde Ömer Halisdemir University, Computer Engineering Department, 51240, Niğde Türkiye*
[2] *Istanbul Technical University, Control and Automation Engineering Department, 34467, Istanbul, Türkiye*

Abstract

As technology progresses in recent years, the advances in transportation continue rapidly. Some of these advances are seen in the railway industry. Especially the innovations in the railway interlocking system make this industry more preferable. One of these innovations is moving block signaling. In an urban rail transport system, moving block signaling has gradually started to replace the fixed block signaling with the development of driverless and communication-based control systems. In this study, an approach has been proposed for moving block signaling. The movement situations between the stations have been shown, by determining a reference speed profile and the relationship between the locations for the following railway vehicles have been evaluated by simulations obtained by MATLAB/Simulink™.

Anahtar kelimeler: Moving block signaling, Communication-based train control, Speed profile, Safe distance

Öz

Son yıllarda teknoloji ilerledikçe, ulaşım sektöründeki ilerleyiş de hızla devam etmektedir. Bu ilerlemelerden bazıları da demiryolu endüstrisinde görülmektedir. Özellikle demiryolu anklaşman sisteminde ortaya çıkan yenilikler bu endüstriyi daha tercih edilir hale getirmektedir. Bu yeniliklerden birisi, hareketli blok sinyalizasyonudur. Şehirlerdeki hafif raylı ulaşım sistemlerinde hareketli blok sinyalizasyonu, sürücüsüz ve haberleşme tabanlı kontrol sistemlerinin gelişmesiyle, yavaş yavaş sabit bloklu sinyalizasyonun yerine geçmeye başlamıştır. Bu çalışmada da, hareketli blok sinyalizasyonu için bir yaklaşım önerilmiştir. Bir referans hız değeri belirlenerek, istasyonlar arasındaki hareket durumları gösterilmiş ve birbirlerini takip eden demiryolu araçları için konumlar arasındaki ilişki değerlendirilmiştir.

Keywords: Hareketli blok sinyalizasyonu, Haberleşme tabanlı tren kontrolü, Hız profili, Emniyetli mesafe

1 Introduction

In the railway industry, signaling systems play a crucial role in ensuring the safe and efficient operation of railway traffic. These systems are essential for regulating train movements, preventing collisions, and optimizing the flow of both passenger and freight transportation. Over the years, various signaling methods have been developed and implemented to enhance railway safety and efficiency. However, certain methods have exhibited limitations in terms of safety, reliability, and adaptability to evolving transportation demands. Consequently, research and development efforts have been continuously pursued to identify and implement more robust and efficient signaling solutions. In particular, advancements in technology, such as artificial intelligence, wireless communication, and real-time data processing, have facilitated the development of innovative signaling methods. These technological improvements not only enhance safety but also contribute to the automation and optimization of railway operations, paving the way for more intelligent and adaptive railway signaling systems in the future.

The development of communication and control technologies has contributed to the advancement of communication-based train control systems. The moving-block signaling system is one of these innovative methods. In the moving block concept, trains move with a certain movement authority received from the control center. In this case, bidirectional communication is used between the trains and the control center to know the position and speed information of the trains.

In the literature, there are some studies about moving block signaling, communication-based train control systems, and automatic train operation. In [1], a Fuzzy control mechanism for the automatic train operation system is proposed, compared with a PID controller, and evaluated the performance of the system. In [2], a tracking algorithm with a fuzzy control system used in metro lines operated with communication-based train control systems is proposed, claiming that the existing basic tracking algorithm is not useful for energy efficiency due to short-term traction-brake cycle and compared this proposed algorithm with the existing algorithm in terms of energy consumption, running time and steady-state interval. In [3], it has been developed a speed profile to minimize energy consumption in a metro line operated with a communication-based train control system with the help of fuzzy logic parameters based on the NSGA-II(Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm) method. In [4], for moving block signaling, a cellular

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: eates@ohu.edu.tr (E. Ateş)
Geliş / Received:21.02.2025 Kabul / Accepted:16.05.2025 Yayımlanma / Published:15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1644645

automaton model is proposed for the simulation of the train movement under mixed traffic conditions, creating a control strategy to reduce energy consumption and examine the dynamic behavior of the train. In [5], a predictive function control method with a complex H_2/H_∞ control approach is proposed to develop the performance of the communication-based train control systems, and a Linear Matrix Inequality approach is proposed to solve the control problem. In [6], two different intelligent train operation algorithms with expert systems and a Reinforcement Learning method are proposed to be used in metro line and compared the difference in energy consumption with an algorithm developed for manual use.

In [7], a nonlinear programming method for automatic train control in moving block signaling, a smoothing algorithm to develop the speed trajectory are proposed and indicated that energy saving and ride comfort are obtained. In [8], a Finite-State Markov Modeling is proposed for wireless channels in tunnel communication-based train control systems and compared with real-time data considering the position information of trains. In [9], Online adaptive PD-based Least Square Support Vector Regression for speed control in moving block signaling is proposed and the results are evaluated considering braking distance and dynamic train equations.

This study presents a novel control approach for dynamically determining the safe distance in moving block signaling systems. While the existing literature mainly focuses on energy efficiency, speed profile optimization, or algorithm performance, this work demonstrates how the safe distance between trains can be calculated over time using physical dynamic modeling. The mass-spring model developed for a four-car train system enables the analysis of motion scenarios in which the movement initiation and speed profile of the following train are optimized based on the position of the leading train. In this respect, the study provides significant contributions to both safety and operational efficiency, particularly for driverless and communication-based train control systems. Furthermore, the proposed approach offers a more application-oriented perspective compared to existing models in the literature, due to its scalability to multi-train scenarios.

In Section 2, information on the methods used in this study is given. In Section 3, simulation results and discussion are given. In Section 4, the conclusion is given.

2 Materials and methods

2.1 Dynamic model of the train

For analysing various train movement scenarios, the single-point train control method is employed as a fundamental approach. This method allows for precise monitoring and regulation of train dynamics at a specific control point, enabling the assessment of factors such as acceleration, deceleration, and stopping accuracy [10-13]. In this control model, a multi-carriage train is considered as a single-point mass and its movement profile is calculated by a Newton equation given in Eq. (1). For this equation, the dynamic model of the train is given in Figure 1. Thus, the formulation of the train movement is given as

$$M\dot{v}(t) = F(t) - B(t) - w(v) - g(x) \tag{1}$$

$$\dot{x}(t) = v \tag{2}$$

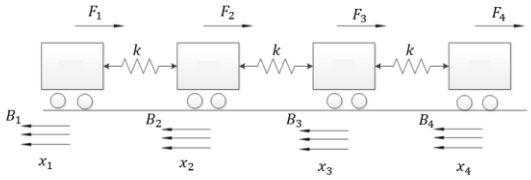


Figure 1. A dynamic model of the train

Where M is the mass of the train, x is the position of the train, v is the speed of the train, t is time, $F(t)$ is the traction force of the train and $B(t)$ is the braking force of the train. Besides, $w(v) = M(c_0 + c_1 v + c_2 v^2)$ is called Davis formula and represents the air resistance and mechanical resistances. $g(x)$ represents the gradient resistance with respect to the position of the train [14].

Therefore, if we consider a train consisting of n vehicles connected by n−1 couplers, the dynamic equations governing the motion of the train can be formulated accordingly. These equations take into account various factors such as the traction and braking forces acting on each vehicle, the resistive forces due to air resistance and track friction, as well as the interactions between the vehicles through the couplers. By incorporating these elements, the mathematical model effectively describes the train's longitudinal dynamics, enabling a detailed analysis of its acceleration, deceleration, and overall motion characteristics. The resulting equations provide a foundation for optimizing train control strategies, improving stability, and enhancing the efficiency of railway operations.

$$\begin{aligned} m_1\ddot{x}_1 &= F_1 - B_1 - k\Delta x_{1,2} - m_1(c_0 + c_1\dot{x}_1 + c_2\dot{x}_1^2) \\ &\quad + R_1^a(x) \\ m_i\ddot{x}_i &= F_i - B_i - k(\Delta x_{i,j+1} - \Delta x_{i-1,j}) \\ &\quad - m_i(c_0 + c_1\dot{x}_i + c_2\dot{x}_i^2) + R_i^a(x) \\ m_n\ddot{x}_n &= F_n - B_n - k\Delta x_{n-1,n} \\ &\quad - m_n(c_0 + c_1\dot{x}_n + c_2\dot{x}_n^2) + R_n^a(x) \end{aligned} \tag{3}$$

Where x_i is position, m_i is the mass, F_i is the traction force and B_i is the braking force of the i-th vehicle. $\Delta x_{i,j+1}$ represents the displacement between i-th and i+1-th vehicle. $R_i^a(x)$ represents the adding resistance force with respect to train position [14].

2.2 Some approaches

In this study, two trains, referred to as Train A and Train B, are considered to be moving in the same direction while following each other within the framework of a moving block signaling system. This system dynamically adjusts the permissible distance between consecutive trains based on real-time operational conditions, enhancing both safety and efficiency in railway traffic management. In this context, Train A is assumed to be the leading train, while Train B is

the following train, maintaining a safe separation to prevent collisions. The minimum safe distance between these two trains is determined based on factors such as train speed, braking performance, system response time, and signaling constraints, ensuring that Train B can always decelerate safely without compromising operational efficiency. By this way, if it is assumed that the train A is the leading train and train B is the following train, the minimum safe distance between these trains is

$$d_{min}(t) = d_M + d_{BB}(x_{BN}(t), v_B(t)) \tag{4}$$

In this equation, d_M represents safe margin distance. This is minimum distance value between A and B when both of them stop. d_{BB}, x_{BN} and v_B represent safe braking distance, nose position of train B and velocity of train B. According to the equation, safe braking distance changes with respect to x_{BN} and v_B. However, x_{BN} is ignored generally and d_{BB} only depends on v_B. If d_{BB} is obtained only depends on v_B and deceleration value of train is constant, the equation is given as

$$d_{BB}(v_B) = \frac{v_B^2}{2\beta_S} \tag{5}$$

Where β_S is the deceleration of the train. If the minimum distance equation is rewritten.

$$d_{min}(t) = d_M + \frac{v_B^2}{2\beta_S} \tag{6}$$

By this way, the distance relation between train A and train B is given as

$$d_{min}(t) = x_{AT} - x_{BN} \tag{7}$$

It can be observed that the acceleration of Train B is equal in magnitude but opposite in direction to the deceleration. This indicates that both trains experience the same acceleration, ensuring symmetrical motion dynamics between them. As a result, their kinematic behaviors remain consistent, leading to synchronized motion patterns that maintain balance in their respective speed variations. This characteristic is particularly important in coordinated train control systems, where maintaining uniform acceleration profiles enhances operational efficiency and safety [15].

$$x_{AT} - x_{BN} = d_M + \frac{v_B^2}{2\beta_S} \tag{8}$$

2.3 Movement conditions

x_{AT} stands for the tail position of train A, assuming that $x_{AT}(0) = 0$, is given as

$$x_{AT} = \frac{1}{2}\alpha_A t^2 \tag{9}$$

Where α_A is the acceleration of train A and if it is used as the positive value of deceleration, this value is obtained as $\alpha_A = n\beta_s, n > 0$, [15]. As specified before, in moving block strategy trains move a certain tracking distance. Accordingly, there is a time difference between the following vehicles. Therefore, train B starts to move after Train A takes a certain path. If the time taken by train A is called t_d, train B starts after $t + t_d$ time. In this way, the nose position of train B is obtained as

$$x_{BN} = \frac{1}{2}\alpha_B(t - t_d)^2 \tag{10}$$

If (8) is expressed more clearly, movement condition is obtained as

$$x_{BN}(t - t_d) = \frac{1}{2}n\beta_s t^2 - d_M - \frac{v_B^2(t - t_d)}{2\beta_s} \tag{11}$$

If both sides of (11) are differentiated with respect to t, it is obtained as

$$v_B(t - t_d) = n\beta_s t - \frac{v_B(t - t_d)\alpha_B(t - t_d)}{\beta_s} \tag{12}$$

If the velocity of Train B is expressed as $v_B(t - t_d) = \alpha_B.(t - t_d)$, assuming a constant acceleration α_B, the corresponding relationship is obtained. This formulation implies that Train B follows a linear velocity profile with respect to time, where α_B represents its uniform acceleration. Such an assumption simplifies the dynamic analysis and facilitates further derivations in the context of motion modeling and control.

$$\alpha_B = \frac{n\beta_s^2 t - \beta_s\alpha_B.(t - t_d)}{\alpha_B.(t - t_d)} \tag{13}$$

By this way, α_B is considered as zero when $t < t_d$, where $\alpha_B = -\beta_s$.

It can be observed that the acceleration of Train B is equal in magnitude but opposite in direction to the deceleration of Train A. This symmetry implies that both trains experience identical acceleration characteristics, ensuring a balanced and coordinated motion dynamic between them. As a result, the movement of Train B mirrors the deceleration phase of Train A, maintaining consistency in their respective speed transitions. This property is particularly significant in railway control systems, as it enables smoother train operations, minimizes abrupt changes in motion, and enhances safety by preserving the necessary separation distance between consecutive trains. Furthermore, this symmetrical motion dynamic facilitates precise scheduling, optimizing traffic flow while ensuring adherence to operational constraints.

3 Simulation results and discussion

Simulation results are obtained using MATLAB/Simulink™ by implementing the proposed

methodology, and the parameter values utilized in this study are summarized in Table 1 for reference [16,17].

Table 1. Parameters used in the simulation

Parameter	Value	Unit of Measurement
m_1	35000	kg
m_2	30000	kg
m_3	30000	kg
m_4	35000	kg
k_1	300000	N/m
k_2	300000	N/m
k_3	300000	N/m
c_0	8.202	kN
c_1	0.10656	kNs/m
c_2	0.01193	kNs^2/m^2
l_A	60	m
l_B	60	m
d_M	20	m

Considering a light rail transport system operating with a maximum speed of 35 m/s and traveling from one station to another within an average duration of 120 seconds, the corresponding speed profile for this system is illustrated in Figure 2. This speed profile serves as a reference for Train A, providing a baseline for analyzing its motion characteristics. Based on this reference, the position and acceleration of Train A over time are depicted in Figure 3 and Figure 4, respectively. These figures enable a comprehensive examination of the train's dynamic behavior, facilitating insights into its velocity transitions, acceleration phases, and overall motion patterns throughout the journey.

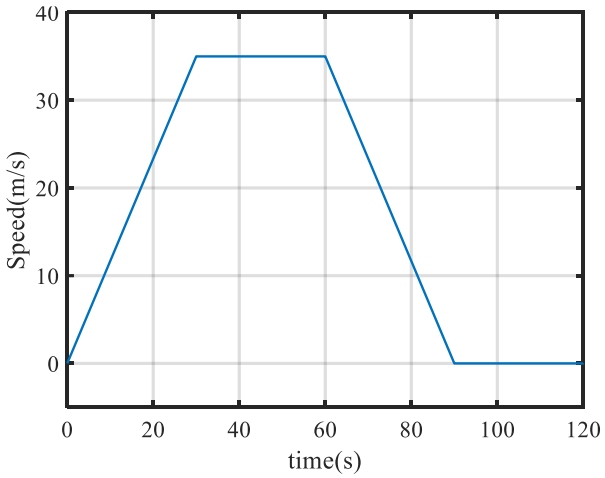


Figure 2. The reference speed profile for train A

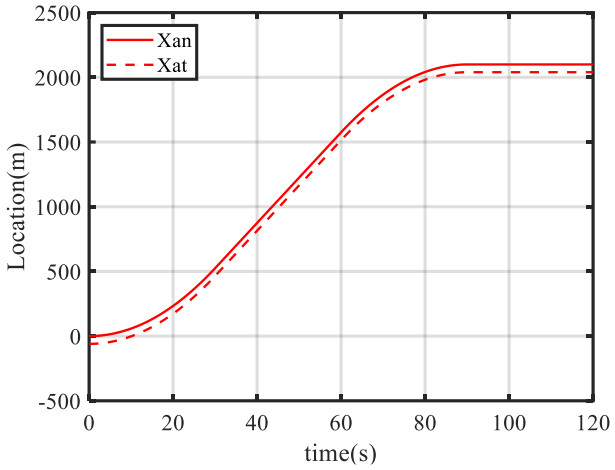


Figure 3. The position of train A with respect to the reference speed profile

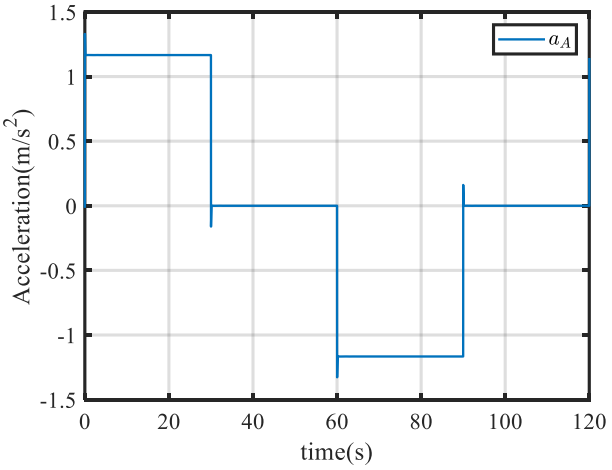


Figure 4. The acceleration of train A with respect to the reference speed profile

The acceleration value derived from the reference speed profile is assigned as the reference acceleration for Train B, as both trains experience the same acceleration under the given conditions. By utilizing this approach, a speed profile is established for Train B, enabling the calculation of the minimum safe distance required between the two trains. However, as evident from the governing equations, Train B does not start moving immediately but instead begins its motion after Train A has traveled a certain distance. This initial gap corresponds approximately to the minimum safe distance, ensuring that Train B can accelerate safely without the risk of collision. To account for this delayed movement, a time delay is introduced into the system, representing the interval before Train B initiates its motion. Based on these defined parameters, the resulting speed profile of Train B, incorporating the time delay effect, is illustrated in Figure 5, providing a clear representation of its velocity evolution over time.

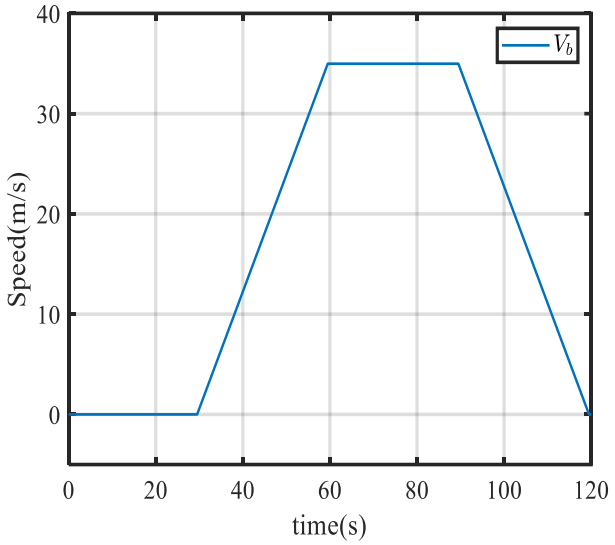


Figure 5. The speed profile of train B

Utilizing this information, a position comparison between the two trains is illustrated in Figure 6, providing insights into their relative movement over time. In this figure, the minimum safe distance, determined from the position values for a speed profile with a maximum velocity of 35 m/s, is calculated to be approximately 527.6 meters. This safe distance ensures that Train B can initiate motion without the risk of a collision while maintaining the necessary separation from Train A. Consequently, Train B begins to move precisely when the tail position of Train A reaches this predefined safe distance. Based on the obtained simulation results, the corresponding time at which Train B starts moving is approximately 29.504 seconds. This analysis highlights the impact of safe distance constraints on train scheduling and movement coordination, contributing to efficient and secure railway operation.

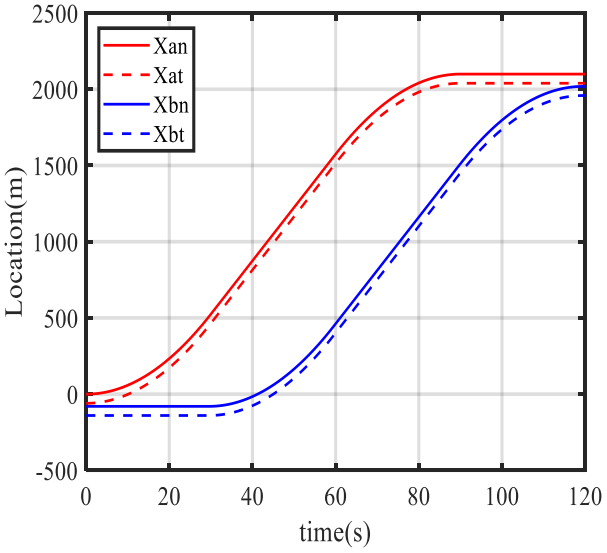


Figure 6. The positions of two trains.

If this approach is applied to a railway system consisting of three stations, the corresponding reference speed profile is illustrated in Figure 7, while the position relationships of the trains with respect to this profile are depicted in Figure 8. These figures provide a clear representation of the trains' motion dynamics, demonstrating how their speed and position evolve over time. As observed from these figures, Train B begins to decelerate precisely at 89.504 seconds. This timing is crucial, as it indicates that the separation distance between Train A and Train B at this moment is approximately equal to the calculated minimum safe distance. Maintaining this safe distance ensures that Train B can decelerate smoothly without violating safety constraints, thereby preventing potential risks of collision while optimizing operational efficiency. The results further validate the effectiveness of the implemented approach in ensuring safe and synchronized train movements across multiple stations.

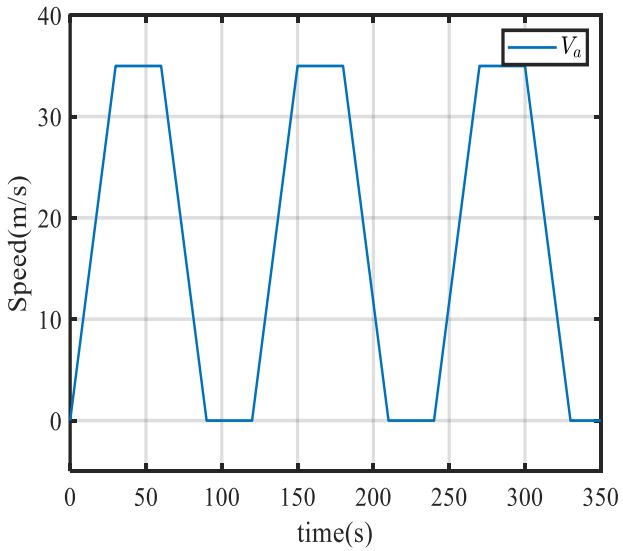


Figure 7. The reference speed profile that represents the movement between three stations

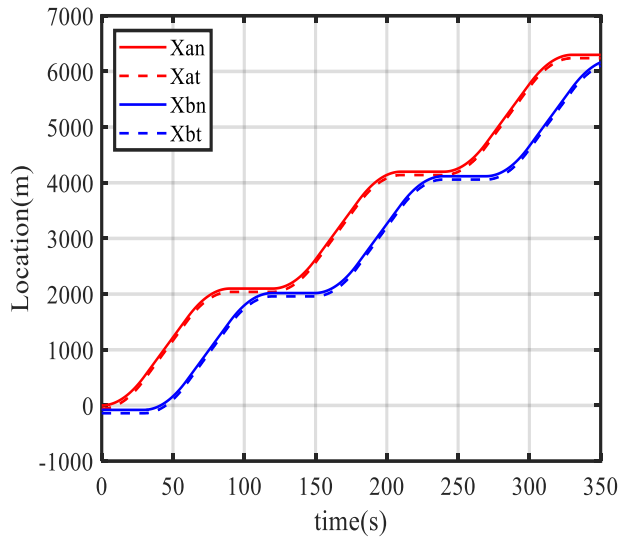


Figure 8. The locations of two trains between three stations

The distance between the two trains at the moment when Train B comes to a complete stop is illustrated in Figure 9. From the figure, it is evident that when Train B stops, the separation distance between Train A and Train B closely approximates d_M, which represents the minimum required safe distance. This observation confirms that the proposed motion control strategy successfully maintains the necessary spacing between the trains throughout their journey, ensuring safe operation within the railway system. The consistency of this distance also highlights the effectiveness of the applied approach in regulating train movements, minimizing the risk of collisions, and optimizing train scheduling efficiency. Furthermore, maintaining this predefined separation is critical for adherence to railway safety standards and operational reliability, particularly in high-density railway networks.

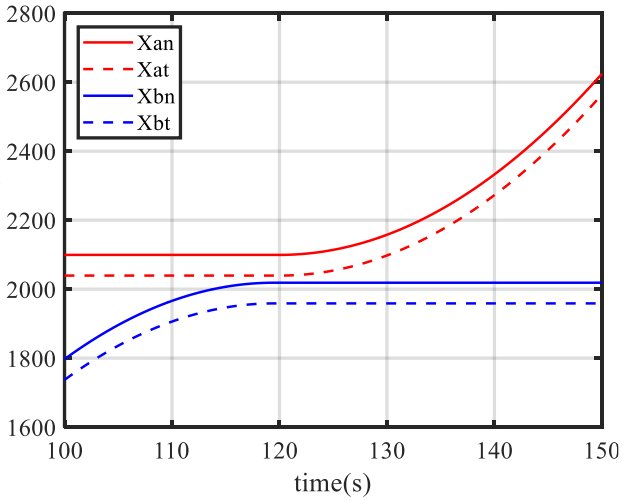


Figure 9. The distance relation between two trains when train B stops.

If this study is extended to a scenario involving three trains following each other, the corresponding position profiles for all three trains are illustrated in Figure 10. Additionally, Table 2 presents the quantitative values of position, speed, and time for the three vehicles, providing a detailed numerical representation of their motion dynamics. In this table, the highlighted values indicate the critical moments when each train begins to move or comes to a stop. For example, at 29.504 seconds, the difference between x_{AT} and x_{BN} is approximately equal to the minimum safe distance, which is computed based on the maximum speed of the following train and the deceleration rate of the preceding train. This confirms that Train B initiates movement precisely at this moment, ensuring a safe and efficient transition. This pattern is consistently followed throughout the system, demonstrating the effectiveness of the applied approach in maintaining safe separation and synchronized motion between multiple trains. The results further validate the methodology's applicability in multi-train operations, optimizing both safety and railway traffic flow.

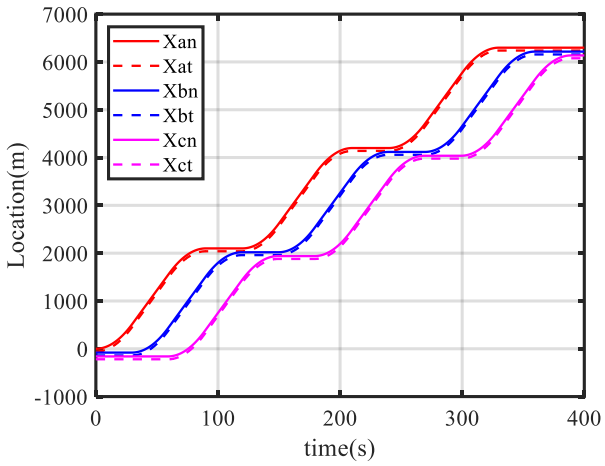


Figure 10. The position relations of three trains

Table 2. Quantitative values

Time(s)	x_{AN} (m)	x_{AT} (m)	x_{BN} (m)	x_{BT} (m)	x_{CN} (m)	x_{CT} (m)
29.504	508	448	-80	-140	-160	-220
59.012	1540	1480	428	368	-160	-220
90	2099	2039	1511	1451	399	339
119.504	2099	2039	2019	1959	1431	1371
149.012	2590	2530	2019	1959	1939	1879
149.504	2607	2547	2019	1959	1939	1879
179.012	3639	3579	2526	2466	1939	1879
210	4199	4139	3610	3550	2498	2438
239.504	4199	4139	4117	4057	3530	3470
269.012	4690	4630	4117	4057	4037	3977
269.504	4706	4646	4117	4057	4037	3977
299.012	5739	5679	4625	4565	4037	3977
330	6298	6238	5709	5649	4597	4537
359.504	6298	6238	6216	6156	5629	5569
389.012	6298	6238	6216	6156	6136	6076

4 Conclusion

In this study, a control approach for moving block signaling is proposed. For this approach, train dynamic model is modelled using mass-spring model, adding rolling stock resistance and rail resistance. This model is obtained ignoring motor dynamics, quarter vehicle model and energy loss and speed profile, acceleration value and position are obtained with a reference speed profile using PID controller.

In the proposed study, for the trains following each other, the following train starts to move with respect to a certain distance covered by the leading train. It means that, the following train starts to move after a certain delay. By this way, acceleration value of the following train is obtained as the negative of the deceleration and this value is given as a reference value to the following train. Then, the speed profile of the following train is obtained and a safe distance value depending on the maximum speed of the following train is calculated. The aim of this approach is to show that the trains transmit the position and speed information by

communicating with the radio block centre which calculates the safe distance value according to these data and sends a movement command to the following vehicle according to distance covered by the leading train.

This study is proposed for the trains following each other on the single line and operated with the references. In the future work, new algorithms will be operated considering the movements for the variable speed and position conditions in the railway switch. In addition, the proposed method is planned to be evaluated in comparison with different algorithms and analyzed based on additional performance metrics such as energy consumption.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

Similarity Rate (iThenticate): 18%

References

[1] S. Yasunobu, S. Miyamoto, and H. Ihara, Fuzzy Control For Automatıc Traın Operatıon System, in Control in Transportation Systems, 1984, pp. 33–39, doi: 10.1016/B978-0-08-029365-3.50010-9.

[2] W. Carvajal-Carreño, A. P. Cucala, and A. Fernández-Cardador, Fuzzy train tracking algorithm for the energy efficient operation of CBTC equipped metro lines, Eng. Appl. Artif. Intell., vol. 53, pp. 19–31, 2016, doi: 10.1016/j.engappai.2016.03.011.

[3] W. Carvajal-carreño, A. P. Cucala, and A. Fernández-cardador, Engineering Applications of Artificial Intelligence Optimal design of energy-efficient ATO CBTC driving for metro lines based on NSGA-II with fuzzy parameters, Eng. Appl. Artif. Intell., vol. 36, pp. 164–177, 2014, doi: 10.1016/j.engappai.2014.07.019.

[4] K. P. Li, Z. Y. Gao, and B. H. Mao, Energy-optimal control model for train movements, Chinese Phys., vol. 16, no. 2, pp. 359–364, 2007, doi: 10.1088/1009-1963/16/2/015.

[5] B. Bu, J. Yang, S. Wen, and L. Zhu, Predictive function control for communication-based train control (CBTC) systems, Int. J. Adv. Robot. Syst., vol. 10, 2013, doi: 10.5772/53514.

[6] J. Yin, D. Chen, and L. Li, Intelligent train operation algorithms for subway by expert system and reinforcement learning, IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 15, no. 6, pp. 2561–2571, 2014, doi: 10.1109/TITS.2014.2320757.

[7] Q. Gu, Y. Meng, and F. Ma, Energy saving for automatic train control in moving block signaling system, China Commun., vol. 11, no. 14, pp. 12–22, 2014, doi: 10.1109/ITSC.2011.6082964.

[8] H. Wang, F. R. Yu, L. Zhu, T. Tang, and B. Ning, Finite-state Markov modeling for wireless channels in tunnel communication-based train control systems, IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 15, no. 3, pp. 1083–1090, 2014, doi: 10.1109/TITS.2014.2298038.

[9] M. S. Durmus, K. Ucak, G. Oke, and M. T. Soylemez, Train speed control in moving-block railway systems: An online adaptive pd controller design, in IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), 2013, vol. 1, no. PART 1, pp. 7–12, doi: 10.3182/20130916-2-TR-4042.00022.

[10] A. Albrecht, P. Howlett, P. Pudney, X. Vu, and P. Zhou, The key principles of optimal train control—Part 1: Formulation of the model, strategies of optimal type, evolutionary lines, location of optimal switching points, Transp. Res. Part B Methodol., vol. 94, pp. 482–508, 2016, doi: 10.1016/j.trb.2015.07.023

[11] R. Liu and I. M. Golovitcher, Energy-efficient operation of rail vehicles, Transp. Res. Part A Policy Pract., vol. 37, no. 10, pp. 917–932, 2003, doi: 10.1016/j.tra.2003.07.001.

[12] S. Su, X. Li, T. Tang, and Z. Gao, A Subway Train Timetable Optimization Approach Based on Energy-Efficient Operation Strategy, vol. 14, no. 2, pp. 883–893, 2013, doi: 10.1109/TITS.2013.2244885.

[13] Y. Wang, B. De Schutter, J. J. Van Den Boom, and B. Ning, Optimal trajectory planning for trains under fixed and moving signaling systems using mixed integer linear programming, Control Eng. Pract., vol. 22, pp. 44–56, 2013, doi: 10.1016/j.conengprac.2013.09.011.

[14] J. Yin, T. Tang, L. Yang, J. Xun, Y. Huang, and Z. Gao, Research and development of automatic train operation for railway transportation systems: A survey, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 85. pp. 548–572, 2017, doi: 10.1016/j.trc.2017.09.009.

[15] R. Takagi, Synchronisation control of trains on the railway track controlled by the moving block signalling system, IET Electr. Syst. Transp., vol. 2, no. 3, p. 130, 2012, doi: 10.1049/iet-est.2011.0053.

[16] B. Allotta, L. Chisci, P. D'Adamio, S. Papini, and L. Pugi, Design of an Automatic Train Operation (ATO) system based on CBTC for the management of driverless suburban railways, 12th IMEKO TC10 Work. Tech. Diagnostics New Perspect. Meas. Tools Tech. Ind. Appl. Proc., vol. 0, pp. 84–89, 2013.

[17] CEE 3604 Rail Transportation: Addendum Rail Resistance Equations.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 981-989

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Robotik süreç otomasyonu ile üniversite süreçlerinin dönüşümü: Erciyes Üniversitesi örneği

Transformation of university processes with robotic process automation: The case of Erciyes University

Tayyip Özcan[1,*], Münire Tuğba Şimşek[2]

[1,2] *Erciyes Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 38000, Kayseri Türkiye*

Öz

Robotik Süreç Otomasyonu (Robotic Process Automation, RPA), rutin görevlerin yürütme süresini kısaltarak çalışanların daha yaratıcı görevlere odaklanmasını sağladığı için dijital dönüşüm süreçlerinde önemli bir teknoloji haline gelmiştir. 2012'den beri kullanılan RSO, iş süreçlerinin yeniden yapılandırılmasında yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu çalışmada, Erciyes Üniversitesi bünyesindeki Öğrenci İşleri Daire Başkanlığı(ÖİDB) ve Bilgi İşlem Daire Başkanlığı(BİDB) gibi birimlerin öğrenci kayıtları, not girişleri ve burs başvuruları gibi zaman alan tekrarlayan işlemleri incelenmiş ve RSO ile otomasyona uygun süreçler belirlenmiştir. Manuel işlemlerden kaynaklanan iş yükünün azaltılması ve süreçlerin verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir. Çalışma, RSO'nun üniversiteye sağladığı faydaları değerlendirerek kamu kurumları ve üniversitelere yol gösterici olmayı amaçlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Robotik süreç otomasyonu, RSO, Verimlilik

Abstract

Robotic Process Automation (RPA) has become a significant technology in digital transformation processes as it shortens the execution time of routine tasks, allowing employees to focus on more creative assignments. RSO, which has been in use since 2012, is widely preferred for restructuring business processes. In this study, time-consuming and repetitive tasks such as student registrations, grade entries, and scholarship applications carried out by units like the Student Affairs Department (ÖİDB) and the Information Technology Department (BİDB) at Erciyes University were analyzed, and processes suitable for automation with RSO were identified. The aim was to reduce the workload caused by manual operations and increase the efficiency of processes. This study evaluates the benefits of RSO for the university and aims to serve as a guide for public institutions and universities.

Keywords: Robotic process automation, RPA, Efficiency

1 Giriş

RSO, kural tabanlı ve tekrarlayan iş süreçlerini yazılımsal robotlar aracılığıyla otomatikleştiren bir teknolojidir. RSO, kullanıcı hareketlerini taklit ederek veri işleme, e-posta gönderimi, sistem entegrasyonu ve belge yönetimi gibi işlemleri hızlı ve hatasız bir şekilde gerçekleştirebilir. RSO teknolojisi, son yıllarda dijital dönüşüm süreçlerinde en hızlı yayılan otomasyon araçlarından biri haline gelmiştir [1, 2]. Özellikle kamu sektöründe ve yükseköğretim kurumlarında RSO kullanımına yönelik ilgi giderek artmaktadır [3]. Bu teknolojinin sağladığı en önemli avantajlar arasında operasyonel verimliliğin artırılması, hata oranlarının azaltılması ve çalışanların daha yaratıcı ve stratejik işlere odaklanmasına olanak tanıması yer almaktadır. Ayrıca, süreçlerin analiz edilerek optimize edilmesine de katkı sağlamaktadır.

Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi bilişim hizmetlerinde RSO'nun uygulanabilirliğini araştırmayı amaçlamaktadır. Öğrenci kayıtları, not girişleri ve burs başvuruları gibi manuel ve zaman alan süreçlerin otomasyonu incelenerek, RSO'nun üniversite genelinde sağlayabileceği faydalar değerlendirilecektir. Çalışma, hem dijital dönüşüm sürecine katkı sağlamak hem de kamu kurumları için yol gösterici bir örnek sunmayı hedeflemektedir.

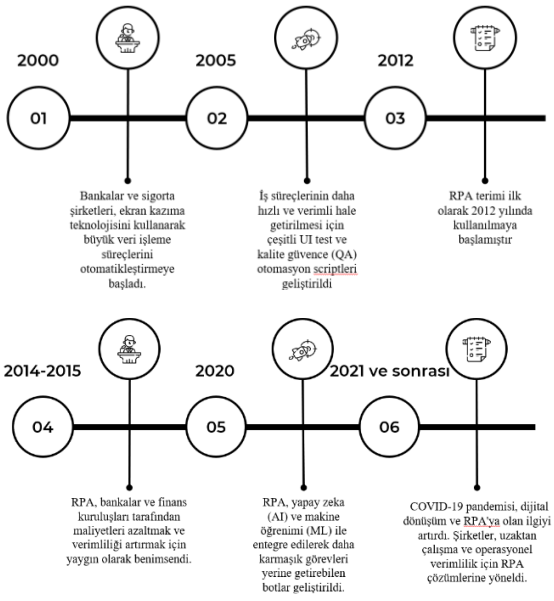
2 Türkiye'de RSO uygulamaları

Türkiye'de Robotik Süreç Otomasyonu (RSO) kullanımı, özellikle bankacılık, sigortacılık, telekomünikasyon ve kamu hizmetleri alanlarında yaygınlaşmıştır. Bankacılık sektöründe Garanti BBVA, Akbank ve Türkiye İş Bankası gibi büyük kuruluşlar; kredi değerlendirme, müşteri kimlik doğrulama ve fatura işleme gibi süreçlerde RPA teknolojilerini aktif şekilde kullanmaktadır. Telekomünikasyon alanında Turkcell ve Türk Telekom, müşteri destek süreçlerini ve arıza takibi işlemlerini RPA ile hızlandırmıştır. Kamu sektöründe ise Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) ve Gelir İdaresi Başkanlığı (GİB) gibi kurumlar; e-beyanname işlemleri, veri entegrasyonları ve vatandaş taleplerinin otomatik işlenmesi gibi alanlarda RSO uygulamalarına yönelmiştir.

Eğitim alanında ise özellikle pandemi süreciyle birlikte bazı üniversitelerde öğrenci kabul işlemleri, belge düzenlemeleri ve personel özlük dosyalarının yönetimi gibi

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: tozcan@erciyes.edu.tr (T. Özcan)
Geliş / Received: 13.01.2025 Kabul / Accepted: 16.05.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1619131

süreçlerde RSO çözümleri devreye alınmıştır. Örneğin, İstanbul Üniversitesi, kayıt işlemlerinin hızlandırılması için RSO uygulamalarından yararlanmıştır. Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) ise öğrenci bilgi sistemlerindeki veri aktarım süreçlerini RSO botları ile otomatikleştirmiştir. Bu örnekler, Türkiye'de RSO 'nun eğitim sektörü de dahil olmak üzere çok çeşitli alanlarda uygulandığını göstermektedir.



Şekil 1. RSO tarihteki gelişimi

3 RSO

RSO, işletmelerde kural tabanlı ve tekrarlayan insan faaliyetlerini otomatikleştirmek için yapay zekâ ve makine öğrenimi gibi ileri düzey teknolojileri kullanan yazılım robotlarının kullanımını ifade eder.

3.1 RSO tanımı ve tarihçesi

RSO, iş süreçlerini otomatikleştirmek için yazılım robotları veya dijital işçiler kullanan bir teknolojidir. Bu robotlar, insanların bilgisayarlar üzerinde gerçekleştirdiği tekrarlayan görevleri taklit eder ve otomatikleştirir.

RSO'nun kökenleri, Şekil 1'de de belirtildiği üzere 2000'lerin başlarına kadar uzanır. İlk başlarda, iş süreçlerini otomatikleştirmek için kullanılan araçlar, genellikle belirli bir yazılımın kullanıcı arayüzü üzerinden işlem yapıyordu. Ancak, RSO teknolojisi, bu araçların ötesine geçerek daha geniş bir uygulama yelpazesi sunmaya başladı.

RSO, özellikle 2010'lu yıllarda bir gelişim göstermiştir. Bu dönemde, RSO araçları daha öenmli bir hale geldi ve yapay zekâ (AI) ile makine öğrenimi (ML) gibi teknolojilerle entegrasyonu arttı. Bu birleşim, RSO'nun daha karmaşık ve değişken iş süreçlerini de etkili bir şekilde otomatikleştirmesine olanak tanıdı.

RSO, günümüzde hiper otomasyon adı verilen daha geniş bir otomasyon stratejisinin parçası olarak görülmektedir. Hiper otomasyon, RSO'nun yanı sıra AI, ML ve süreç madenciliği gibi teknolojileri bir araya getirerek, iş süreçlerini daha etkili ve verimli hale getirmeyi amaçlar [4].

3.2 RSO türleri

RSO, iş süreçlerini optimize etmek için kullanılan üç temel türden oluşur: Katılımlı (Attended), Katılımsız (Unattended) ve Hibrit (Hybrid). Bu türler, farklı iş senaryolarına uygun olarak RSO teknolojisinin nasıl uygulanacağını belirler [5].

3.2.1 Katılımlı süreç otomasyonu

Katılımlı RSO, insanların iş süreçlerinde aktif rol aldığı bir otomasyon türüdür. Bu sistemde, RSO botları insan kullanıcılarla birlikte çalışarak işlerin daha verimli bir şekilde gerçekleştirilmesine yardımcı olur. Süreç, insan kullanıcılar tarafından başlatılır ve kontrol edilir; botlar ise işlemleri tamamlamak için kullanıcılardan gelen komutları takip eder. İnsan ve bot arasındaki bu iş birliği, özellikle insan karar verme süreçlerinin kritik olduğu durumlarda avantaj sağlar. Katılımlı RSO, otomasyon ve insan katkısını birleştirerek iş süreçlerinde dengeli bir yapı oluşturur. Uçtan uca otomasyonun mümkün olmadığı senaryolarda, çalışanların masaüstü ortamlarına entegre edilerek kullanıcı deneyimini iyileştirir ve iş süreçlerini kolaylaştırır.

3.2.2 Katılımsız süreç otomasyonu

Katılımsız RSO, tamamen otomatik bir şekilde, insan müdahalesi olmadan çalışan süreçleri ifade eder. Bu sistemde, RSO botları tekrarlayan ve büyük hacimli görevleri yerine getirmek için programlanır ve 7/24 çalışabilir. Özellikle veri işleme, raporlama veya sistem bakımı gibi arka ofis işlemleri için idealdir. İnsan etkileşiminin sınırlı olduğu bu otomasyon türü, operasyonel maliyetleri düşürürken doğruluk oranını artırır ve süreçlerin hızını optimize eder. Bu yapı sayesinde kuruluşlar, rutin görevleri otomatikleştirerek insan kaynaklarını daha stratejik işlere yönlendirebilir. Katılımsız RSO, işletmeler için verimliliği artıran bir dijital iş gücü olarak düşünülebilir.

3.2.3 Hibrit süreç otomasyonu

Hibrit RSO, Katılımlı ve Katılımsız RSO'nun bir araya gelerek oluşturduğu bir modeldir. Bu yapı, insan müdahalesi gereken süreçlerle tamamen otomatikleştirilebilen süreçlerin bir kombinasyonunu sunar. Hibrit RSO, insan etkileşimi ile bağımsız çalışan botların uyum içinde çalıştığı bir sistemdir ve bu sayede farklı iş ihtiyaçlarına yönelik esneklik sağlar. Botların hem ön yüz hem de arka yüz süreçlerine entegre olmasıyla işletmeler, geniş bir otomasyon stratejisi geliştirebilir. Hibrit RSO, kuruluşların çeşitli birimlerinde farklı süreçleri optimize ederek verimlilik ve çevikliklerini artırmalarına olanak tanır.

3.3 Devlet üniversitelerinde RSO kullanım alanları

Üniversitelerde dijital dönüşüm kapsamında RSO kullanımı, akademik ve idari verimliliği artırma amacıyla kullanılmaktadır. Kullanım alanlarına örnekler aşağıdaki gibidir:

3.3.1 Öğrenci işleri süreçleri

Kayıt İşlemleri: Yeni öğrenci kayıtları, ders seçimleri ve dönem yenileme işlemlerinin otomatikleştirilmesi.

Not İşlemleri: Akademik personelin girdiği notların toplu olarak sistemlere aktarımı.

Diploma ve Belge Yönetimi: Diploma hazırlama, öğrenci belgesi veya transkript gibi belgelerin oluşturulması ve gönderilmesi.

3.3.2 *Akademik süreçler*

Araştırma Destek İşlemleri: Proje başvuruları, raporlama ve araştırma fonlarının takip edilmesi.

Etkinlik Yönetimi: Konferans ve seminerlerin duyurularının otomatik yapılması, katılımcı bilgileri ve geri bildirimlerin işlenmesi.

3.3.3 *Finans ve bütçe yönetimi*

Burs ve Ödeme Süreçleri: Burs başvurularının değerlendirilmesi, uygun adayların seçimi ve ödemelerin planlanması.

Fatura ve Satın Alma İşlemleri: Üniversite harcamalarının ve tedarikçi faturalarının kontrol edilmesi, onaylanması ve işlenmesi.

3.3.4 *Personel özlük işleri*

Personel İşlemleri: Personel özlük dosyalarının oluşturulması, performans değerlendirme raporlarının hazırlanması.

Başvuru Süreçleri: İşe alım süreçlerinde başvuruların sınıflandırılması ve uygun adayların belirlenmesi.

3.3.5 *Kütüphane ve bilgi hizmetleri*

Kataloglama ve Arşivleme: Kitap ve diğer kaynakların kataloglama işlemlerinin otomasyonu.

Üyelik Yönetimi: Yeni üye kayıtlarının ve ödünç verme işlemlerinin düzenlenmesi.

3.3.6 *BT destek hizmetleri*

Kullanıcı Yönetimi: Öğrenci ve personel için e-posta ve kullanıcı hesaplarının oluşturulması.

Sistem Güncellemeleri: Yazılım ve donanım güncellemelerinin planlanması ve raporlanması.

3.3.7 *Veri analitiği ve raporlama*

Öğrenci Başarı Analizleri: Öğrencilerin akademik başarılarının analiz edilmesi ve raporlanması.

Veri Toplama: Farklı sistemlerden veri toplayarak analizler için hazır hale getirilmesi.

3.4 *Literatür taraması*

Son dört yıl içinde RSO, Verimlilik, Robotik Süreç Otomasyonu anahtar kelimeleri kullanılarak kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır. Science Direct, Web of Science, Taylor and Francis, YÖK Tez Merkezi ve diğer veri tabanları incelenerek elde edilen çalışmalar aşağıda özetlenmiştir. Araştırmalar sonucunda, RSO'nun genellikle araştırma makalelerinde ele alındığı, ancak üniversite içi uygulamalara dair herhangi bir RSO örneğine rastlanmadığı belirlenmiştir. Bu nedenle, bu çalışma literatürdeki bu boşluğu doldurabilecek yenilikçi bir özellik taşımaktadır.

Baştürk, yaptığı bu çalışmada, bankacılık sektöründe yoğun iş yükü oluşturan araç rehin teminata alma sürecinin RSO kullanılarak iyileştirilmesi ele alınmıştır. Süreç analizi sonucunda manuel iş yükünün 4.51 Full Time Equivalent **(**FTE) olduğu, RSO uygulaması ile bu değerin 0.0027 FTE'ye düştüğü görülmüştür. Bu iyileştirme sayesinde operasyonel verimlilik ve doğruluk artırılmış, çalışanların motivasyonu yükselmiş ve müşterilere daha hızlı hizmet sunulmuştur. Süreç iyileştirmesiyle, manuel iş gücünün büyük ölçüde azaltıldığı ve bankanın dijital dönüşüm kapasitesinin artırıldığı vurgulanmıştır. Çalışma, RSO'nun rutin, tekrarlı işlerde verimlilik sağlarken insan kaynaklarının daha katma değerli işlere yönlendirilmesine katkı sağladığını göstermektedir [6].

Çivak çalışmasında, Lojistik sektöründe faaliyet gösteren bir işletmede, teslimat süreçlerinin RSO teknolojisi ile nasıl iyileştirilebileceği araştırılmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, başlangıç aşamasında üç sürecin RSO'ya uygun olduğu tespit edilmiştir. UiPath kullanılarak geliştirilen bu süreçlerde, ilk süreçte %83, ikinci süreçte %80 ve üçüncü süreçte %82 oranında verimlilik artışı sağlanmıştır. Bu bulgular, manuel işlemlerin robotik sistemlere aktarılmasının verimliliği önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Ayrıca, çalışanların rutin ve tekrarlayan işlerden kurtulup daha değerli görevlere odaklanabilmesi sağlanmıştır. Araştırmalar, RSO'nun iş gücü üzerindeki etkilerine dair endişelere rağmen, birçok çalışanın yeni mesleklerde kariyer değişiklikleri yaptığını ve bu değişimlerin veriye ve yapay zekâya dayalı alanlarda yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, RSO teknolojisinin uygulanması, teslimat süreçlerinin uçtan uca otomatikleştirilmesine ve süreçlerin optimize edilmesine olanak tanımaktadır [7].

Can, tezindede, çağrı merkezi operasyonlarının e-posta ayrıştırma süreçlerinde Natural Language Processing (NLP) ve RSO teknolojilerinin entegrasyonu incelenmiştir. Geliştirilen otomasyon sistemi, e-posta sınıflandırma ve yönlendirme süreçlerini optimize ederek iş gücünü daha verimli kullanmayı sağlamıştır. NLP algoritmalarıyla e-postalardan anlamlı bilgiler çıkarılırken, RSO araçları bu bilgileri sınıflandırma ve ilgili birimlere yönlendirme işlemlerini gerçekleştirmiştir. Bu yaklaşım, manuel süreçlerdeki hataları azaltmış, operasyonel hız ve doğruluk oranını artırmış ve müşteri memnuniyetini iyileştirmiştir. Bulgular, NLP ve RSO teknolojilerinin birleştirilmesinin çağrı merkezi dinamiklerini dönüştürme potansiyelini net bir şekilde ortaya koymuştur [8].

Yetiz ve arkadaşları çalışmalarında, bankacılık sektöründe RSO iş gücü verimliliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. İncelenen banka, RSO entegrasyonu sayesinde yaklaşık 6 kişilik iş gücü (5.83 FTE) tasarrufu sağlamış ve bu kaynakları farklı alanlara yönlendirme fırsatı elde etmiştir. Çalışma, RSO'in operasyonel süreçlerde maliyetleri azalttığını, hata oranlarını düşürdüğünü ve personelin daha stratejik işlere odaklanmasını sağladığını göstermektedir. Ayrıca, müşteri memnuniyetinde belirgin bir artış sağlandığı ve süreçlerin daha hızlı, kesintisiz ve hatasız şekilde yürütüldüğü tespit edilmiştir. Bu bulgular, RSO'in bankacılık sektöründe dijital dönüşüm ve verimlilik artışı için kritik bir araç olduğunu ortaya koymaktadır [9].

Seçkiner ve arkadaşları çalışmalarında, RSO havacılık sektöründeki faydaları ve pandemi dönemi uygulamaları ele almıştır. Çalışma, RSO'in özellikle tekrarlayan ve kural tabanlı süreçlerde iş gücünü optimize ederek maliyetleri azalttığını, operasyonel hız ve doğruluk oranını artırdığını

göstermektedir. Örneğin, gelir denetimi süreçlerinde insan kaynaklı hata oranlarının düşürüldüğü ve manuel denetim yerine RSO uygulamaları ile %100'e yakın doğruluk sağlandığı tespit edilmiştir. Ayrıca, pandeminin etkisiyle hız kazanan dijital dönüşüm sürecinde, RSO'in uçuş planlama, biletleme ve müşteri hizmetleri gibi alanlarda süreç verimliliğini artırdığı vurgulanmıştır. Çalışma, RSO'in maliyet yönetimi ve müşteri memnuniyeti üzerinde uzun vadeli etkiler yarattığını ortaya koymaktadır [10].

H.Bıyık, RSO'nun e-ticaret sektöründe sipariş sayısının artması ve ürün kalemlerinin fazlalığı ile ilişkisi üzerine yaptığı çalışmada RSO'nun işletmelerin operasyonel verimliliğini artırmada ve iş süreçlerini optimize etmede önemli bir rol oynadığını göstermektedir. RSO'nun sipariş süreçlerine entegrasyonu, işletmelerin daha yüksek sipariş hacimlerini yönetebilme kapasitelerini artırmakta ve otomatikleştirilen süreçler sayesinde siparişlerin hızlı ve hatasız bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Bu durum, müşteri memnuniyetini artırırken, işletmelerin müşteri taleplerine daha hızlı ve etkili yanıt vermelerine olanak tanımaktadır. Ayrıca, RSO'nun sağladığı otomasyon çözümleri, işletmelerin operasyonel karmaşıklığını yönetmede önemli avantajlar sunmakta ve ürün çeşitliliğini artırarak müşterilere geniş bir ürün yelpazesi sunmalarını mümkün kılmaktadır. Sonuç olarak, RSO'nun e-ticaret sektöründe sipariş sayısının artması ve ürün kalemlerinin fazlalığı üzerindeki olumlu etkileri, işletmelerin operasyonel verimliliğini artırmakta ve müşteri memnuniyetini sağladığı tespit edilmiştir [11].

Özdem ve Bora (2021) çalışmalarında, dünya genelinde hızla gelişen teknolojik gelişmelerden biri olan RSO'in ne olduğunu, tarihsel gelişimini ve mevcut durumunu kapsamlı bir şekilde ele almışlardır. RSO, büyük hacimli ve kural tabanlı işleri yazılımsal robotlar aracılığıyla hatasız ve kesintisiz bir şekilde gerçekleştirerek, işletmelere zaman ve maliyet açısından önemli verimlilik kazandıran bir teknolojik inovasyon olarak tanımlanmıştır. Çalışmada, RSO'nun çeşitli sektörlerdeki uygulamaları ve bu teknolojinin sağladığı faydalar detaylı bir şekilde incelenmiştir. Özellikle, RSO'nun Türkiye'deki durumu ve sektörler tarafından ne ölçüde benimsendiği üzerine yapılan araştırmalar ve anket çalışmaları, bu teknolojinin ülkemizdeki yaygınlığı hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Ayrıca, çalışmada RSO'nun gelecekteki potansiyeli ve bu teknolojinin iş dünyasında yaratabileceği dönüşümler üzerine öngörülerde bulunulmuştur. Bu derleme çalışması, farklı kaynaklardan yararlanarak RSO'ya dair geniş bir perspektif sunmayı ve bu alandaki literatürdeki boşlukları doldurmayı amaçlamaktadır [1].

Kaba çalışmasında, RSO teknolojisinin işletmelerde kullanımına yönelik çalışan perspektifinden bir değerlendirme yapılmıştır. Anket sonuçlarına göre, katılımcıların büyük çoğunluğu (%85), RSO'nun iş süreçlerinde verimliliği artırdığını ve manuel iş yükünü azalttığını ifade etmiştir. Ayrıca, süreçlerde %30'a varan hata oranı azalması ve işlem hızında %40'lık bir artış sağlandığı görülmüştür. Çalışma, RSO'nun rutin, tekrarlı işlerde insan hatasını sıfıra indirerek operasyonel verimliliği artırdığını, çalışan motivasyonu ve memnuniyetini iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Bu bulgular, RSO'nun işletmelerin dijital dönüşüm süreçlerinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir [12].

Mohammed, N. J. M çalışmasında, RSO ile yapay sinir ağları (ANN) tabanlı akademik araştırmaların verimliliğini artırmayı amaçlamıştır. RSO, veri toplama, ön işleme, ANN modelleme ve sonuç doğrulama gibi aşamaların otomasyonunda kullanılmıştır. Manuel süreçlerin toplamda 38 dakikaya kadar zaman aldığı testlerde, RSO'nun aynı işlemleri sadece 30 saniyede tamamladığı ve doğruluk oranını %85'ten %96'ya çıkardığı tespit edilmiştir. Sonuçlar, RSO'nun akademik araştırmalarda iş yükünü ve hata oranını önemli ölçüde azaltarak verimliliği artırabileceğini göstermektedir. Çalışma, RSO'nun daha karmaşık makine öğrenimi projelerine uygulanabilirliğini araştırmayı hedefleyen gelecek çalışmalara yol göstermektedir [13].

Çalışkan, çalışmasında bir otomotiv şirketinde RSO'nun iş süreçlerindeki etkilerini incelemiştir. RSO uygulamaları sayesinde manuel süreçlerde yıllık 2.7 FTE iş gücü tasarrufu sağlanmış ve süreçlerin hızında %40'lık bir artış gözlemlenmiştir. RSO'nun özellikle fatura denetimi ve tedarik zinciri yönetimi gibi süreçlerde hataları azaltarak doğruluğu artırdığı, operasyonel maliyetleri düşürdüğü ve çalışan memnuniyetini artırdığı tespit edilmiştir. Çalışma, RSO'nun tekrarlayan görevlerde sağladığı verimlilikle dijital dönüşüm süreçlerinde işletmelere stratejik bir avantaj sunduğunu ortaya koymuştur [14].

Dünya genelinde yapılan çalışmalar, RSO'nun iş süreçlerinde %30-40 arasında zaman tasarrufu sağladığını ve hata oranlarını %90'a kadar azalttığını göstermektedir [4,13].

4 Materyal ve metot

RSO üniversite bilişim hizmetlerinde kullanılmak üzere bir uygulama örneği için öğrencilerin, Öğrenci Staj SGK İşe Giriş ve İşten Çıkış süreçleri seçilmiştir. Süreç iki aşamadan oluşmaktadır. Öncelikle süreç tasarım dokümanı hazırlanarak analiz kısmı gerçekleştirilmiş sonrasında analize uygun bir şekilde RSO aktarımı sağlanmıştır.

4.1 Erciyes Üniversitesi'nde otomasyona alınan süreçler

Mezuniyet Belgesi İşlemleri: Mezuniyet belgelerinin hazırlanması ve öğrencinin kimlik doğrulama kontrollerinin yapılması.

Transkript Başvuruları: Öğrencilerin transkript taleplerinin alınması, kontrolü ve PDF belgelerinin oluşturulması.

Öğrenci Bilgi Güncelleme: Öğrencilerin telefon, e-posta gibi bilgilerinin otomatik sistemlerde güncellenmesi.

Ders Kayıt Kontrol İşlemleri: Ders seçimi yapan öğrencilerin kayıtlarının otomatik olarak kontrol edilmesi ve sistemlere işlenmesi.

Bu süreçler, hem iş gücü verimliliğini artırmış hem de öğrenci işlemlerinin hata payını minimuma indirgemiştir. Özellikle yoğun dönemlerde bu süreçlerin robotlar tarafından yürütülmesi, iş yükünü büyük oranda azaltmıştır. Eğitim sektöründe RSO'nun benimsenmesi, idari süreçlerdeki iş yükünü azaltmak açısından değerlidir.

4.2 Yöntem

RSO Süreç Tanımlaması: Bu aşama, RSO paydaşlarının otomasyon için uygun aday olan iş süreçlerini ve görevleri belirlemesini kapsar. Süreçler ve görevler, otomasyon potansiyeli açısından detaylı bir şekilde analiz edilir.

Değerlendirme ve Önceliklendirme: Değerlendirme ve önceliklendirme sürecinde, otomasyona aday olarak seçilen iş süreçleri ve görevler tasarım ve geliştirme aşamalarına uygunluk açısından analiz edilir. Bu değerlendirme, teknik fizibiliteyi içerir. Örneğin, bir sürecin fazla sayıda karar mekanizması içermesi veya çoklu sistemlerle karmaşık bir etkileşim gerektirmesi, onun otomasyon için uygun bir aday olmamasına yol açabilir. Ayrıca, değerlendirme sırasında otomasyonun iş değerine katkısı da dikkate alınır. Görev veya sürecin yüksek hacimli olması, manuel yürütme yerine otomasyona geçirilmesiyle zaman tasarrufu sağlanması, manuel hataların azaltılması ve çıktı kalitesinin artırılması gibi faktörler göz önünde bulundurulur. Önceliklendirme, hangi otomasyonların tasarım ve geliştirme sürecine alınacağını ve bu otomasyonların iş değerine ve geliştirme zorluğuna göre sıralanmasını ifade eder.

Tasarım: Tasarım aşaması, otomasyona geçirilecek süreç veya görevlerin detaylı bir şekilde tanımlanması ve modellenmesi ile başlar. Bu aşamada, sürecin etkileşimde bulunduğu sistemler ve bağlı olduğu düzenlemeler gibi bağımlılıklar da analiz edilir. Tasarım süreci, RSO geliştiricisine otomasyonun nasıl uygulanacağını anlaması için bir yol haritası sunar. Tasarım aşamasında, Process Design Document/Süreç Tasarım Dokümanı (PDD) ve Software Design Document/Yazılım Tasarım Dokümanı (SDD) hazırlanır:

- PDD: Otomasyon için seçilen iş sürecinin ana hatlarını belirten dokümandır.
- SDD: PDD'ye dayanarak, otomasyon sürecine rehberlik etmek amacıyla hazırlanan yazılım tasarım dokümanıdır.

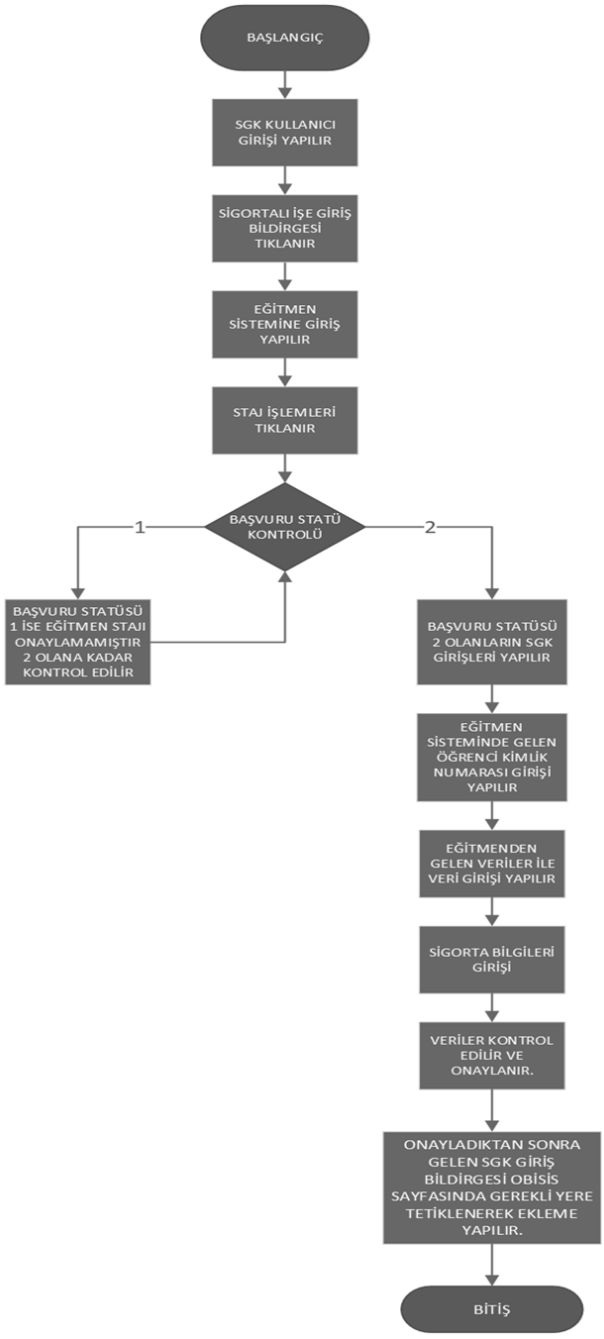
Geliştirme: Geliştirme aşamasında, RSO geliştiricisi tasarım aşamasında belirlenen gereksinimler doğrultusunda RSO yazılım araçlarını (UiPath Studio) kullanarak otomasyonu hayata geçirir.

Test: Test aşamasında, geliştirilen RSO çözümü test verileri ile değerlendirilir. Test sonuçları analiz edilerek, varsa eksiklikler tespit edilir ve ilgili paydaşlardan geri bildirim alınır. Bu süreç, otomasyonun doğru bir şekilde çalıştığını ve beklentilere uygun olduğunu doğrular.

Önerilen senaryoda RSO botu bir dizi otomasyon adımını gerçekleştirmektedir, iş akış şekli Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilmiştir.

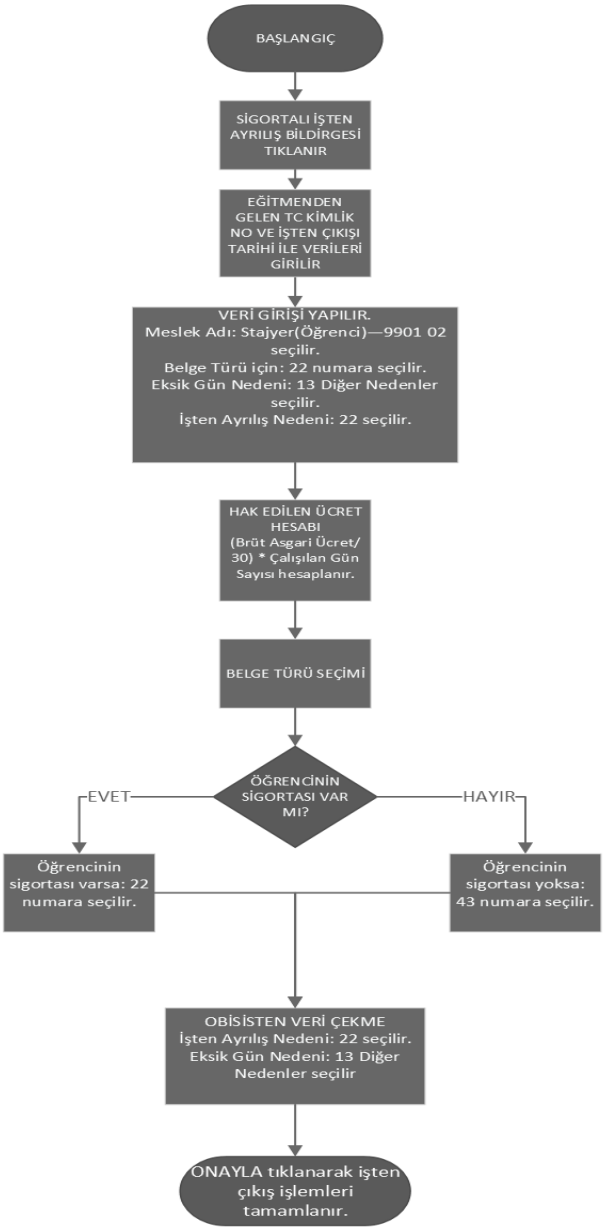
4.2.1 RSO'nun kullanıldığı süreçlerin özellikleri

RSO'da kullanılacak süreçlerin detayları Süreç Seçim ve Kabul Tablosunda yer almaktadır. RSO kullanımına karar vermeden önce, sürecin uygunluğu, robot kullanımının faydaları ve riskleri değerlendirilmektedir. Bu tabloda, sürecin RSO robotu ile otomatize edilmesine karar verildiğinde, sürecin başarıyla tamamlanması için gereken adımların atılmasını sağlar.



Şekil 2. Öğrenci SGK staj giriş

Süreç uygunluğu değerlendirilirken RSO Süreç Seçim ve Kabul Tablosunda bulunan sorulara verilen yanıtlar onaydan geçerek aktarım için kabul edilir. Tablo doldururken verilen yanıtlar ve değerlendirme kriterleri doğru süreçleri tanımlamak için çok önemlidir. RSO'nun herhangi bir iş sürecinde uygulanmasından önce, sürecin uygunluğunu değerlendirmek için aşağıdaki temel sorular göz önünde bulundurulur [15]:



Şekil 3. Öğrenci SGK çıkış

- Süreç kuralları açık ve net bir şekilde tanımlanmış mı?
- Süreç, tekrarlayan bir yapıya mı sahip? Haftalık veya günlük olarak mı yürütülüyor?
- Her işlemde aynı adımlar izleniyor mu?
- Süreç manuel olarak mı yürütülüyor ve bu nedenle hatalara açık mı?
- Standart bir süreç mi, yoksa organizasyon genelinde farklılıklar gösteriyor mu?
- Süreç, bir çalışan tarafından dijital ortamda mı yönetiliyor?
- Düzenleyici yönergelere ve kısıtlamalara uyum sağlanması gereken bir süreç mi?
- Sistemin performansını etkileyen ve darboğaz yaratan bir işlem var mı?

RPA Süreç Detayları		
Birim		
Süreç Temsilcisi (Ad-Soyad/Unvan)		
Süreç Adı		
Süreciniz manuel ve tekrarlı mı? (Manuel/Tekrarlı)		
Sürecinizi manuel işletirken çok fazla hata alıyor musunuz? (Evet/Hayır/biliyorsanız sebebi)		
Girdileriniz standart mı? (Evet/Hayır)		
Süreciniz kural bazlı mı? (Evet/Hayır)		
Sürecinize ait iş akış diyagramı var mı?		
Sürecinizi etkileyen yasal talimat/prosedür var mı? (Evet/Hayır)		
Planlanan değişiklikler var mı? Süreç farklı şekilde ilerletilebilir mi? (Evet/Hayır)		
Yakın zamanda değişmesi planlanıyor mu? (Evet/Hayır)		
Yapılacak geliştirme, daha geniş birim ve kişiler tarafından kullanılabilir mi? (Evet/Hayır)		**Hangi birim/kişi? :**
Süreçte kullanılan uygulamalar nelerdir? (SAP/Excel/Word/Outlook/EBA/ITSM/SF/SQL)		
Sürecinizden kısaca bahsedebilir misiniz?		
Süreciniz manuel olarak ne kadar zaman alıyor? (Kişi/saat veya dakika)		
Süreciniz (günde/haftada/ayda/yılda) kaç kez tekrarlanıyor?		
Süreciniz için minimum ön koşullarınız nelerdir?		

Şekil 4. RSO süreç seçim ve kabul tablosu

- Daha önce veri girişlerinde hata oluşmuş mu?
- Süreç, eleştirel düşünme gerektirmeyen görevler içeriyor mu?
- Kritik ve hızlı müdahale gerektiren bir iş mi?
- Dijital olarak okunabilir veri girişleri içeriyor mu?
- Yüksek hacimli ve yoğun emek gerektiren bir süreç mi?
- Yakın gelecekte değişiklik yapılması planlanıyor mu?
- Şu anda manuel olarak yürütülüyor ve insan hatasına açık bir durumda mı?
- Süreç her uygulandığında aynı adımlar tekrarlanıyor mu?
- Manuel kontrol ve hatırlatmalarda sorun yaşanıyor mu?
- Süreç, dijital uygulamalarla çalışan bir personel tarafından mı yürütülüyor?
- Süreç kuralları, standartlar veya yasal düzenlemeler tarafından net bir şekilde belirlenmiş mi?

4.3 Materyal

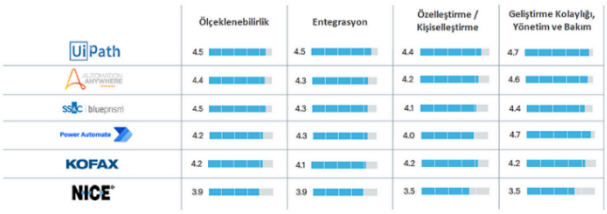
Erciyes Üniversitesi BİDB kullanılmış olan dijital sistemlerden öğrencilerin staj giriş ve staj çıkış işlemleri için robotik otomasyon programı olan UiPath Studio ile nasıl otomatikleştirildiği ve sistemin kullanıcılar üzerindeki verimliliği anlatılmıştır.

Şekil 5. Gartner Robotik Süreç Otomasyonu (RSO) Magic Quadrant, Temmuz 2023

Gartner'ın Temmuz 2023 tarihli RSO Magic Quadrant'ı,[15] Robotik Süreç Otomasyonu pazarındaki önemli oyuncuları "Yürütme Yeteneği" ve "Vizyonun Tamamlanmışlığı" kriterlerine göre değerlendirmektedir. Şirketler, dört ana kategoriye ayrılmaktadır [16]:

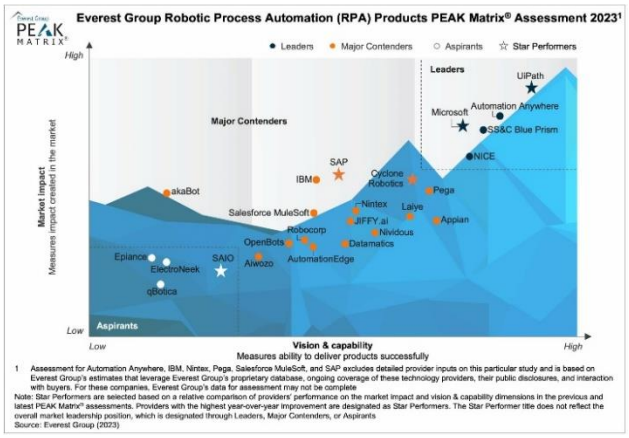
- Liderler: UiPath, Automation Anywhere, SS&C Blue Prism, Microsoft
- Meydan Okuyanlar: NICE
- Vizyonerler: Pegasystems, Appian, Salesforce
- Niş Oyuncular: Cyclone Robotics, Samsung SDS, EdgeVerve Systems, Nintex, Hyland, IBM, Laiye

Şekil 5'te, RSO çözümleri seçilirken dikkate alınması gereken ana oyuncuları ve piyasa trendlerini öne çıkararak, Erciyes Üniversitesi'nin süreç dönüşümü için doğru kararlar vermesine yardımcı olacaktır.



Şekil 6. RSO ile sanal iş gücü üretimi

Şekil 6'da da görüldüğü gibi, UiPath Studio, ölçeklenebilirlik, entegrasyon, özelleştirme/küçük ayarlamalar ve geliştirme kolaylığı gibi kritik alanlarda rakiplerine kıyasla oldukça yüksek puanlar almıştır. Bu, platformun kullanıcı dostu bir yapıya sahip olmasının yanı sıra geniş entegrasyon olanakları ve güçlü bir özelleştirme kapasitesi sunduğunu göstermektedir. Özellikle geliştirme sürecini kolaylaştırması ve bakım aşamasında sağladığı avantajlar, UiPath Studio'yu projelerimiz için ideal bir çözüm haline getiriyor.



Şekil 7. RSO şirketleri pazar payı araştırması

Şekil 7'de görüldüğü üzere UiPath, Gartner ve Forrester'a göre dünyada lider RSO ürünü olduğu için geliştirme UiPath Studio ortamında yapılacaktır [4].

5 Bulgular ve tartışma

5.1 Bulgular

Toplam FTE Kazanımı: Çalışanların RSO devrettikleri süreçlerde aylık bazda elde edilen iş gücü kazanımını gösteren metriktir.

Çalışanların RSO'ya (Robotik Süreç Otomasyonu) devrettiği süreçlerde aylık iş gücü kazanımı Tablo 1'de hesaplanmıştır. Bir insanın tam zamanlı mesai süresi (160 saat) temel alınarak yapılan hesaplamalara göre:

- İncelenen sürecin insan tarafından tamamlanma süresi ortalama 0,25 saattir.
- Robot, bu işlemi toplamda 200 kez gerçekleştirmiştir ve toplamda 50 saatlik bir iş yükünü devralmıştır.
- Toplam FTE kazanımı: 0,3125 FTE olarak hesaplanmıştır. Bu, bir çalışanın aylık zamanının %31,25'ine eşittir.

Tablo 1. Toplam FTE kazanımı

İşlem	Değer
İnsan Süresi	0.25 saat (15 dk)
Aylık Çalışma Saati	160 saat
Tamamlanma Sayısı	200 kez
Toplam Süre	0.25 * 200 = 50 saat
FTE Hesaplama	50 / 160 = 0.3125 FTE
Zaman Kazanımı	%31.25

Toplam İş Gücü Kazanımı: Robotun bugüne kadar gerçekleştirdiği tüm başarılı işlemlerden elde edilen kazancı gösteren metriktir. Süreçlerin robotlar tarafından gerçekleştirilmesiyle, maliyet tasarrufu sağlanmıştır. Bir çalışanın aylık maliyeti 16.000 TL olarak kabul edildiğinde, FTE bazında robot kullanımından elde edilen aylık tasarruf: 5.000 TL olmuştur.

Başarı Oranı: Kuyruğa alınan süreçlerin başarı ile tamamlanma oranını gösteren metriktir.

Kuyruğa alınan süreçlerin başarı ile tamamlanma oranı incelenmiştir. Süreçler, belirlenen akışlarda sistemsel veya süreçsel nedenlerle başarısız olabilmektedir. Başarı oranı, toplam başarılı süreç sayısının tetiklenen toplam süreç sayısına oranı ile ölçülmüştür. %97 oranında başarı elde edilmiştir.

Uygulanan farklı süreçlerin karşılaştırmalı analizi Tablo 2'de sunulmuştur:

Tablo 2. Otomasyon süreçlerinin karşılaştırmalı analizi

Süreç Adı	Manuel Süre (dk)	RPA Süresi (dk)	Zaman Kazancı (%)	Hata Azalma Oranı
Staj SGK Giriş-Çıkış	15	2	%86	%100
Mezuniyet Belgesi İşlemleri	20	3	%85	%98
Transkript Başvuruları	10	1	%90	%95
Bilgi Güncelleme İşlemleri	8	1	%88	%92
Ders Kayıt Kontrolü	12	2	%83	%94

Tabloda görüldüğü gibi, RPA uygulamaları süreç sürelerinde %83 ila %90 arasında zaman tasarrufu sağlamış ve hata oranlarını büyük ölçüde azaltmıştır. Bu kazanımlar, Erciyes Üniversitesi'nde RPA kullanımının süreç performansına sağladığı katkıyı açıkça ortaya koymaktadır.

5.2 Tartışma

İş Gücü Kazanımının Önemi: Yapılan hesaplamalar, RSO'nun iş gücü kazanımı açısından önemli bir potansiyel taşıdığını göstermektedir. İncelenen süreçte %31,25 oranında zaman tasarrufu sağlanmıştır. Bu oran, süreçlerin daha verimli bir şekilde yürütülmesine olanak tanımakta ve çalışanların daha katma değerli işlere odaklanmasını sağlamaktadır.

Maliyet Avantajları: İş gücü maliyeti açısından değerlendirildiğinde, robotların kullanımı aylık 5.000 TL gibi bir tasarruf sağlamıştır. Büyük ölçekli organizasyonlarda bu tür tasarruflar, yıllık bazda ciddi maliyet avantajlarına dönüşebilir. Ayrıca, robotların çalışma süreleri ve hata oranlarının düşüklüğü göz önünde bulundurulduğunda, operasyonel verimliliğin de arttığı söylenebilir.

Başarı Oranının İyileştirilmesi: Süreçlerin başarı oranı, sistemin güvenilirliği ve etkinliği açısından kritik bir metriktir. Başarı oranı yüksek olan süreçler, RSO uygulamalarının değerini artırmaktadır. Ancak, sistemsel veya süreçsel hataların azaltılması için süreç analizlerinin derinleştirilmesi ve robotların optimize edilmesi önerilmektedir.

Genel Değerlendirme: Bulgular, RSO'nun süreç verimliliği, iş gücü tasarrufu ve maliyet avantajı açısından etkili bir araç olduğunu göstermektedir. Özellikle tekrar eden, düşük katma değerli işler için robotların kullanılması, organizasyonların rekabet gücünü artırma potansiyeli taşımaktadır. RSO'nun iş süreçlerinde verimlilik ve maliyet avantajı sağladığı, bankacılık [9], lojistik [7] ve e-ticaret sektörlerinde [11] yapılan çalışmalarla da desteklenmektedir. Bu çalışmalarda da görüldüğü gibi, manuel yürütülen işlemlerin otomasyona devredilmesi operasyonel hataları azaltmakta ve çalışan verimliliğini artırmaktadır. Üniversitelerde uygulanan RSO projeleri, kamu sektöründeki dijital dönüşümün önemli bir parçası haline gelmiştir [10].

6 Sonuçlar

RSO, üniversitelerde de birçok alanda olduğu gibi dijital dönüşümün vazgeçilmez bir aracı haline gelmiştir. RSO'nun lisans ve bakım maliyeti dışında herhangi bir ekstra maliyetinin olmaması, 7/24 kesintisiz çalışabilmesi ve süreçleri sıfır hata ile gerçekleştirebilmesi gibi önemli avantajları bulunmaktadır. Aynı zamanda, insan gücünden elde edilen verimlilik artışı da dikkat çekicidir. Hem kamu hem de özel sektörde dijitalleşme hızla devam ederken, üniversiteler de maliyet tasarrufu sağlamak, hata oranını azaltmak, öğrenci deneyimini iyileştirmek ve personelin iş yükünü hafifletmek amacıyla RSO'yı benimsemektedir. Yazılım botları, tekrar eden görevleri çok kısa sürede ve çok fonksiyonlu bir şekilde gerçekleştirebilmektedir. Literatürde, üniversitelerde RSO kullanımı konusunda sınırlı çalışmalar olduğu görülmektedir, bu nedenle bu çalışmanın literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Erciyes Üniversitesi ÖİDB'de gerçekleştirilen pilot uygulamada, Öğrenci Staj SGK İşe Giriş ve İşten Çıkış süreçlerinin RSO botlarıyla yürütülmesinin sağladığı avantajlar ve verimlilik faydaları incelenmiştir. Süreç seçiminde yapılan teknik analiz çalışması, UiPath üzerinde geliştirilen botlarla tamamlanmıştır. Veri toplama aşamasında Öğrenci İşleri Daire Başkanlığı ekiplerinden süreçle ilgili gerekli bilgiler alınmış ve analiz edilmiştir. Bu işlemler, gözlem metoduyla iki ay boyunca gözlemlenmiş ve raporlanmıştır.

Teknik analizde kullanılacak işlemlerin hangi adımlarının robotlara aktarılacağı ile ilgili Öğrenci İşleri ekibiyle birlikte toplantılar yapılmıştır. Daha sonra belirlenen bu veriler ve adımlar Robotik Süreç Otomasyon yazılımlarına aktarılmış ve robotlarla yapılması hedeflenmiştir. Makalede yapılan verimlilik sonucunda robotların kullanılması ile her gün 1 kişinin 1 saatte yapılan bu işlemler robot yazılımlar tarafından tek başına 2 dk da yapılmıştır. Üstelik her gün yapılması gereken bu iş için personeli sıradanlıktan kurtararak hata yapmasının önüne geçmiş ve daha farklı işlere yönelmesine sebep olmuştur.

Robotik süreçlerde kullanılan yazılım robotları, kurumlarda çalışanların harcadığı eforu azaltarak, kaynakların verimli kullanılmasını sağlar. Bu yazılım robotları, işlemlerin hatasız ve kesintisiz bir şekilde gerçekleştirilmesi sayesinde iş gücünden tasarruf sağlar ve süreçlerin olumlu ilerlemesine katkıda bulunur. Personel açısından değerlendirildiğinde, iş yükünün minimuma indirilmesi, çalışanların diğer işlerinde daha verimli, titiz, dikkatli ve planlı çalışmalarına olanak tanır. Bu çalışmada, RSO'nun, süreçlerde kullanılan insan kaynağını azaltarak maliyet tasarrufu sağladığı ve personelin diğer işlerde maksimum verimlilikle çalışmasına olanak tanıdığı gözlemlenmiştir. Türkiye'deki üniversitelerde RSO

uygulamalarının yaygınlaşması, dijital dönüşüm çabalarının bir parçası olarak değerlendirilmiştir [17].

Literatürde, bankacılık [6] ve havacılık sektöründe [10] RSO uygulamalarının süreç verimliliğini artırdığına dair güçlü bulgular bulunmaktadır. Bu çalışmanın bulguları da literatürdeki bu sonuçları desteklemekte ve üniversite süreçlerinde RSO'nun verimlilik artışı sağladığını göstermektedir. RSO'nun iş modeli üzerindeki etkisi, özellikle süreç maliyetlerinin azaltılması ve verimliliğin artırılması açısından dikkat çekicidir [18].

Bu çalışmada elde edilen önemli bir diğer sonuç ise, robotik süreçlerin üniversitelerde uygulanmasının, operasyonel verimliliği artırarak öğrenci ve personel memnuniyetini yükselteceğidir. Akademik ve idari personelin iş yükünü azaltarak, onların daha önemli görevlere odaklanmalarını sağlar, bu da genel iş memnuniyetini ve performansını artırır. Kurumların, tekrarlanan işlemlerini robotik yazılım botlarına uygun hale getirmesi ve insan gücünü daha verimli alanlarda kullanması hedeflenmelidir. Sonuç olarak, robotik süreç otomasyon yazılım botlarının, kurumların verimlilik oranlarını artırmada, işlemleri daha başarılı ve hatasız bir şekilde gerçekleştirmede önemli bir rol oynadığı kanısına varılmıştır.

Teşekkür

Bu çalışma finansal olarak; Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (BAP) tarafından (Proje No: FYL-2024-13756) desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar, bu makalenin araştırılması, yazarlığı ve/veya yayınlanması ile ilgili olarak herhangi bir çıkar çatışması beyan etmemiştir

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

[1] H. Özdem ve M. P. Bora, Türkiye'de robotik süreç otomasyonu, Bilgisayar Bilimleri ve Teknolojileri Dergisi, c. 3, s. 1, ss. 1–9, 2022. https://doi.org/10.54047/bibted.1008340

[2] Y. Dizer, RSO: Robotik süreç otomasyonu ile sanal iş gücü üretimi, https://medium.com/turkcell/RSO-robotik-surec-otomasyonu-ile-sanal-is-gucu-uretimi-c84c251d22a2, Accessed: 15 Kasım 2024.

[3] Gartner, Hype Cycle for Robotic Process Automation, Gartner, 2020.

[4] B. Amini, Robotic Process Automation Implementation within an Organization, 71 s., 2019.

[5] Automation Anywhere, Attended vs Unattended, https://www.automationanywhere.com/RSO/attended-vs-unattended-RSO, Accessed: 8 Kasım 2024

[6] Ö. Baştürk, Bankacılık sektöründe robotik süreç otomasyonu – Bir uygulama örneği, Yüksek Lisans Tezi, , Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2023.

[7] H. Çivak, Robotik süreç otomasyonu: Bir uygulama örneği, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2022.

[8] R. Can, Enhancing call center efficiency through mail parsing using natural language processing and robotic process automation, Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Türkiye, 2024.

[9] F. Yetiz, Y. Turan ve İ. Canpolat, Bankacılık sektöründe robotik süreç otomasyonu ve verimlilik ilişkisi: Bir banka örneği, Verimlilik Dergisi, 2, 65–80, 2021. https://doi.org/10.51551/verimlilik.765336

[10] S. Seçkiner, M. Atay ve Y. Eroğlu, Robotik süreç otomasyonlarının havacılık sektörü uygulamaları ve geleceği, Journal of Aviation, 5(2), 290–297, 2021. https://doi.org/10.30518/jav.947025

[11] H. Bıyık, RSO ile pazaryeri siparişlerinde otomatik faturalandırma süreci, Yüksek Lisans Tezi, Bilgisayar Mühendisliği A.B.D., Kuramsal Temeller Bilim Dalı, Türkiye, 2024.

[12] S. Kaba, Der Einsatz von der RSO Technologie in den Unternehmen und die Bewertung der RSO Technologie aus der Mitarbeiter Perspektive, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Türkiye, 2022.

[13] N. J. M. Mohammed, Robotic Process Automation (RSO) for the implementation on machine learning-based research, Yüksek Lisans Tezi, Altınbaş Üniversitesi, Türkiye, 2022.

[14] L. S. Çalışkan ve S. Kıran, İş süreçlerinin otomasyonunda RSO'nun faydaları, Yönetim Bilişim Sistemleri Dergisi, 6(1), 1–13, 2020. https://doi.org/10.15295/bmij.v8i4.1576

[15] K. Kimes, UiPath named a leader in Gartner® Magic Quadrant™ for five years in a row, UiPath Blog, https://www.uipath.com/blog/RSO/gartner-magic-quadrant-RSO-report, Accessed Mart 2024

[16] Everest Group, Robotic Process Automation (RSO) – Technology Provider Landscape, https://www.everestgrp.com/peak-matrix/robotic-process-automation-RSO-technology-provider-landscape.html, Accessed Kasım 2023

[17] R. Yıldız ve B. Sağlam, Türkiye'deki üniversitelerde robotik süreç otomasyonu (RPA) uygulamaları: Bir durum çalışması, Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri, 23, 456–462, 2021.

[18] B. Tavas, Robotik süreç otomasyonu: İş modeli, Atlas Journal, 6(34), 842–854, 2020. https://doi.org/10.31568/atlas.507

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 990-1000

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Adaptation of a comprehensive simplification method to the Adaptive Exponential Integrate and Fire Neuron and Its FPGA-based verification

Kapsamlı bir basitleştirme yönteminin Uyarlanabilir Üstel Entegre ve Ateşlemeli Nöronuna uyarlanması ve FPGA tabanlı doğrulaması

Bekir Şıvga [1], Nimet Korkmaz [2*]

[1,2] *Department of the Electrical and Electronics Engineering, Kayseri University, 30280, Talas, Kayseri, Türkiye*

Abstract

The preference of a comprehensive method usage is as important as less hardware usage on digital device-based implementations. The mathematical series expansions have a widespread usage in the transformation of expressions into simpler forms. The exponential, trigonometric, logarithmic, etc. functions are usually converted to simpler expressions for digital implementation easiness. In these implementations, it is an expected output that as the operands of the series increases, the revised model converges to the original one. However, the most appropriate number determination of these operands is important for hardware efficiency. In here, the exponential expression of the Adaptive Exponential Integrate and Fire (ADEX) neuron model is expanded up to the tenth operand of the Taylor series. Then, an optimum operand number is identified for getting both hardware utilization efficiency and neuronal meaningfulness. The differences between the original and revised models are compared with the error calculations and the neuronal observations. Lastly, the revised ADEX neuron model is realized by FPGA device to prove the efficiency of the proposed adaptation.

Keywords: Adaptive exponential integrate and fire (ADEX) neuron model, Field Programmable Gate Array (FPGA), Digital implementation, Neuromorphic engineering.

Öz

Dijital cihaz tabanlı gerçekleştirimlerde kapsamlı bir yöntemin kullanılmasının tercihi, az donanım kullanımı kadar önemlidir. Matematiksel seri açılımları, ifadelerin daha basit biçimlere dönüştürülmesinde yaygın bir kullanıma sahiptir. Üstel, trigonometrik, logaritmik vb. işlevler genellikle dijital uygulama kolaylığı için daha basit ifadelere dönüştürülür. Bu uygulamalarda, serinin işlenenleri arttıkça, revize edilmiş modelin orijinal modele yakınsaması beklenen bir çıktıdır. Bununla birlikte, bu işlenenlerin en uygun sayısını belirlenmesi donanım verimliliği için önemlidir. Burada, Uyarlanabilir Üstel Entegre ve Ateşlemeli (ADEX) nöron modelinin üstel ifadesi, Taylor serisinin onuncu işlenenine kadar genişletilmiştir. Daha sonra, hem donanım kullanım verimliliği hem de nöronal anlamlılığı elde etmek için optimum bir işlenen sayısı belirlenmiştir. Orijinal ve revize edilmiş modeller arasındaki farklar, hata hesaplamaları ve nöronal gözlemlerle karşılaştırılmıştır. Son olarak, revize edilmiş ADEX nöron modeli, önerilen adaptasyonun verimliliğini kanıtlamak için FPGA cihazı tarafından gerçekleştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Uyarlanabilir üstel entegre ve ateşlemeli (ADEX) nöron modeli, Alan Programlanabilir Kapı Dizisi (FPGA), Dijital gerçekleştirim, Nöromorfik mühendislik.

1 Introduction

The recent scientific studies focus on the brain functionality from enlightened of its neuronal behavior and structure. Its functionality and morphological structure are based on a collaborative working of the neurons. Thus, the investigation of a single neuron becomes important research issue for understanding the structure of the brain and nervous system. The dynamic behaviors of a real neuron are expressed by the various neuron model and these models are usually represented by the interrelated ordinary differential equations (ODEs) [1-5]. When any biological neuron model defines the response of a neuron, the scope of this model can be classified according to the reflection level of the real neurons' biophysical functionalities to the mathematical definitions. These model definitions can be generalized into three categories [6]: The models, which reflect the trans-inductance definitions such as Hodgkin-Huxley (HH) and Morris-Lecar (ML) models, are in the first category and they describe the details about the biophysical functionalities [4, 5]. The second category involves the connectionist models such as FitzHugh–Nagumo and Hindmarsh-Rose models [7, 8]. These type models focus on the production of the membrane potential rather than the biological functionalities. The last category is neural networks such as Wilson-Cowan model that take into account the synaptic connections between the neuronal populations [9]. This study dwells on the Adaptive

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: nimetkorkmaz@kayseri.edu.tr (N. Korkmaz)
Geliş / Received: 25.10.2025 Kabul / Accepted: 18.05.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1573633

Exponential Integrate and Fire (ADEX) neuron model. This model is a connectionist neuron model, and it is derived from the Integrate&Fire (IF) type model that is one of the basic neuron models [10]. After IF model, its spike-triggered adaptation integrate and fire mechanism version was introduced by Fuortes and Mantegazzini [11]. Subsequently, the leaky-IF model with quadratic descriptions has been introduced for spike-triggered adaptation and they were combined by Treves [12] and Latham et al. [13]. Then, the reset parameter has been added to these definitions as the second state variable Izhikevich [1] and Richardson [14]. Lastly, the parabolic expression in the Izhikevich model is changed by an exponential function in the ADEX neuron model and finally, the ADEX neuron model is presented to the literature [15].

On the other hand, several studies about the hardware emulator circuits of the biological structure, especially biological neuron models are available in literature [17–20]. It has been recently uttered that the bio-inspired structures take place in the information processing process and the control structure in the near future [21]. Thus, the cost-effective hardware implementations of the neurons in a network structure attract the attention. The neuronal structures, which are implemented by the analog [22-28] and the digital [16], [29-31] hardware, are introduced to literature. The processing capacities and the realization speeds of the used hardware, the achieving sufficient accuracy and the providing a comprehensive solution are their desired features. However, the specifying of hardware that offers all these features together is a hard problem. While it is preferred to usages of biological neuron model that has the detailed descriptions of the biological processes in the numerical simulations, two important key points should be considered in the electronic hardware realization process: i) There should be no change in the model dynamics in the realization process, and ii) the used hardware should supply a reasonable part of the mentioned features [32]. While the hardware capacity problems are encountered in the analog programmable platforms-based implementations, the realization complicacy of the non-linear expressions arises in the digital programmable platforms. The mentioned problem about analog platforms is solved by increasing the number of used elements. The mentioned problem with digital platforms is generally tried to be solved by simplifying the nonlinear expression in the model [33-36]. For example, in Ref [33], the parabolic expression in the Izhikevich neuron model has been transformed into piecewise-linear functions for realization easiness on the digital environments. After this transformation, stochastic methods have been used successfully to identify the optimum values of some parameters process in Ref [34]. In Ref [35], two coupled HR neurons have been modified for digital implementation expediency and a low-cost hardware realization. The mathematical definition of the chemical synaptic connection between HR neurons have been transport a approximate function in Ref [36] and the chemical synaptic connection between neurons have been able to embedded to the digital hardware. Additionally, the exponential expression of the ADEX Neuron model has been simplified by utilizing the successful approaches for digital implementation easiness in literature [37-39]. This paper presents also an alternative approach for digital implementation of the ADEX neuron model with the programmable digital hardware. The mathematical series expansion method offers a general solution for contractions of the nonlinear expressions on the digital platforms. The exponential, trigonometric, logarithmic etc. functions have been converted to the addition and multiplication operations. The number of multiplexer is limited in digital hardware, so it is generally preferable to use as little as possible. However, i) if the converting expression is consistent with the characteristic of the original model, ii) unless the model accuracy is compromised, iii) if it has been used a reasonable number of multiplexer, and iv) most importantly, if the proposed alternative approach has a comprehensive application field, it is considered that the discussing of this alternative approach makes significant contributions to literature. In here, the exponential expression of the ADEX neuron model has been re-constructed by utilizing from the Taylor series expansion for realization easiness on digital platform. As the number of operands of the series expansion increases, it is an expected output that the error between modified and original models decreases. Thus, the exponential expression is expanded up to the tenth operand in the Taylor series. As the order of Taylor series increases, it is required to use the more multiplexer. Thus, both the error calculations have been reported and the neuronal dynamics of the modified and original systems are observed with the numerical simulations. According to these error calculation and the numerical simulation results, the fourth order expansion is suitable for the simplification process of this exponential nonlinear expression. As a verification of efficiency of this conversion, the ADEX neuron model, which consists of four operands-Taylor series instead of the exponential function, is realized with Field Programmable Gate Array (FPGA) platform, successfully.

This paper is organized as follows: After the introducing of the ADEX definition and Taylor series expansion, the numerical simulation results, the error calculation and the correlation analyses of original and modified systems are presented in Section II. The hardware verification results of the proposed process are given by using FPGA-based implementations results in Section-III. The obtained outcomes are discussed in the last section.

2 Adaptive Exponential Integrated and Fire (ADEX) Neuron Model

The ADEX neuron model is in the connectionist neuron models category and it is based on the IF type model that is one of the simplest neuron models. The ADEX neuron is derived from the Izhikevich neuron model by changing the nonlinear expressions. The Izhikevich neuron model points out with its computational efficiency and modeling achievement in terms of ability to exhibit the rich neural dynamics. Similar to Izhikevich's one, the ADEX neuron model is a successful neuron model and it is defined by ODEs in Equation 1:

$$C\frac{dV}{dt} = -g_L(V - E_L) + g_L\Delta_T \exp\left(\frac{V - V_T}{\Delta_T}\right) + I_{inj} - \omega$$
$$\tau_\omega \frac{d\omega}{dt} = \alpha(V - E_L) - \omega \quad (1)$$

In Equation 1, the $\{V, C, \omega, \alpha, \tau_w, I, g_L, E_L, V_T, \Delta_T\}$ symbols represents the membrane potential and capacitance, the adaptation variable, adaptation coupling parameter and the adaptation time constant, the input current, leak conductance and the leak reversal potential, the threshold voltage and the slope factor, respectively. The working process in this neuron model is as follows: The external input current (I) is induced the membrane potential (V) by exceeding the threshold voltage (V_T). The exponential term provides positive feedback and it causes the occurrence of the spike behavior.

Additionally, the exponential term corresponds to the sodium channel and the sodium channel causes spike formation in the Hodgkin-Huxley-type neuron model. The positive feedback causes the membrane potential to go to infinity and the reset conditions in Equation 2 are applied in order to prevent infinitive definitions when the membrane potential reaches a finite value.

$$V > 0 \Longrightarrow V \rightarrow V_R \,\&\, \omega \rightarrow \omega_R = \omega + b \quad (2)$$

The reset value of the membrane potential is equalized to V_R and the ω reset value is determined by utilizing the constant b value. The substantial neuronal patterns form by the setting these variables to the optimum values [40]. The list of neuronal dynamics and the values of these parameters are given in Table 1 [41].

As mentioned in introduction part, the digital device-based implementations of the nonlinear expressions (as the exponential function in Equation 1) are difficult. The mathematical series expansion methods offer a general solution for contractions of these nonlinear expressions on the digital platforms. Not only the exponential expression in Equation 1, but many more functions (trigonometric, logarithmic, etc.) can be also converted to a combination of addition/subtraction and multiplication/division operations. Taylor series expansion method is the most well-known of them [42-44]. Taylor series expanses a mathematical function to the infinitive sums of the converted function that is calculated from the derivative at a single point of the original functions. When this single point is equal to zero, this series is named a Maclaurin series [44]. It is common practice to use a finite number of operands to extend a function to a series. The partial sum of the $n + 1$ operands of the Taylor series is an n^{th} -order polynomial. The approximate function converges to the original one at the higher n orders. The Taylor series is a power series (m) and its general expansion is as in Equation 3 [42, 43]:

$$f(m) + \frac{f'(m)}{1!}(x - m) + \frac{f''(m)}{2!}(x - m)^2 + \frac{f'''(m)}{3!}(-m)^3 + \ldots + \frac{f^n(m)}{n!}(x - m)^n \quad (3)$$

These expressions can be rewritten in a generalized form as in Equation 4:

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(m)}{n!}(x - m)^n, \quad (4)$$

The Euler's number-based exponential function is calculated as the sum of the infinite Taylor- Maclaurin series as in Equation 5 [44]:

$$e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \cdots + \frac{x^n}{n!} \quad (5)$$

The error calculation between original and modified models is provided insight their compatibleness. Root mean square error (RMSE) is a common preferred error calculation method and represents the quadratic mean of the differences between these data. In fact, the RMSE is an accuracy measurement method for comparing error calculations of datasets (N) of different models [45]. The RMSE calculation always yields a positive result and its lower values means less erroneous. The calculated error values changes by depending on the number of the used data. RMS error is calculated by Equation 6 [46].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(x_{i(original_data)} - x_{i(modified_data)}\right)^2} \quad (6)$$

The RMSE calculations usually provide information about the difference in the amplitudes of the datasets. However, when investigating the similarities of the original and modified biological neuron models, it is very important to determine their phase relationships. Thus, the calculations of the phase error between two neuronal dynamics are also recorded in the literature. One of the phase error calculation methods is given in Equation 7 [47]:

$$\emptyset(t) = arctan\frac{s_1(t) - s_1(0)}{s_2(t) - s_2(0)} \quad (7)$$

Table 1. The values of the parameters in the ADEX neuron model for substantial neural dynamics [41].

Neural Dynamics	C (pF)	g_L (nS)	E_L (mV)	V_T (mV)	Δ_T (mV)	α (nS)	b (pA)	τ_w (ms)	V_R (mV)	I (pA)
Regular Spiking	200	10	-70	-50	2	2	0	30	-58	500
Tonic Spiking	200	12	-70	-50	2	2	60	300	-58	500
Intrinsic Bursting	130	18	-58	-50	2	4	120	150	-50	400
Bursting	200	10	-58	-50	2	2	30	120	-46	210
Inhibition Spiking	200	12	-70	-50	2	-10	0	120	-58	110
Inhibition Bursting	200	12	-70	-50	2	-10	30	300	-47	110

If the biological neuron model is identified as $\dot{x} = f(x)$, $s_1(t) = s_1(x, \dot{x}, \ddot{x} \dots)$ and $s_2(t) = s_2(x, \dot{x}, \ddot{x} \dots)$ are arbitrary combinations of the state variables. The phase synchronizations of two neuronal dynamics are provided in the $\emptyset_1(t) \cong \emptyset_2(t)$ situation. According to this situation, the phase differences between these dynamics can be represented by utilizing the Equation 8.

$$Phase\ Error = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} |\emptyset_1(i) - \emptyset_2(i)|} \tag{8}$$

On the other hand, the correlation analysis is another statistical method [48]. This method provides information about the direction and amount of the relationship between different datasets. The correlation coefficient ($\rho_{X,Y}$) is a measure of the linear relationship between two independent variables(X, Y) and this coefficient is between the $-1 \leq \rho_{X,Y} \leq 1$ range. When the correlation coefficient approaches zero, it indicates the existence of a weak relationship between these variables. If these variables increase or decrease together, there is a positive relationship. If one variable increases while the other decreases (or vice versa), there is a negative relationship. The correlation calculation is as in Equation 9 for two independent variables.

$$\rho_{X,Y} = \frac{(N\sum_{i=1}^{N} X_i Y_i) - ((\sum_{i=1}^{N} X_i)(\sum_{i=1}^{N} Y_i))}{\left(\sqrt{(N\sum_{i=1}^{N} X_i^2) - (\sum_{i=1}^{N} X_i)^2}\right)\left(\sqrt{(N\sum_{i=1}^{N} Y_i^2) - (\sum_{i=1}^{N} Y_i)^2}\right)} \tag{9}$$

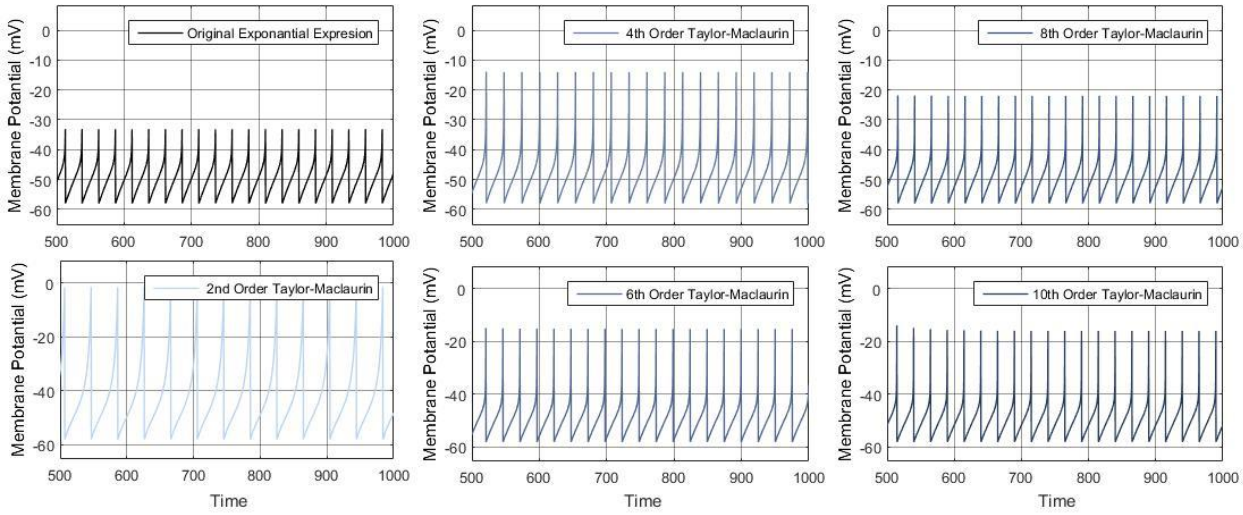
where, while the X_i independent variable represents the dataset of the original ADEX neuron model, the Y_i independent variable is the dataset of the modified neuron model.

These mentioned error calculations have been executed for determining the compatibility between the original and the modified ADEX models. In these calculations, the exponential expression in the modified neuron model is extended to the tenth operand of the Taylor series. In this process, the error calculation results, which are calculated for N=3000 term, are recorded to Table 2. This table includes both the RMSE and phase error results. Additionally, the correlation results, which are a measure of their linear relationships, have been also calculated and recorded in the same table.

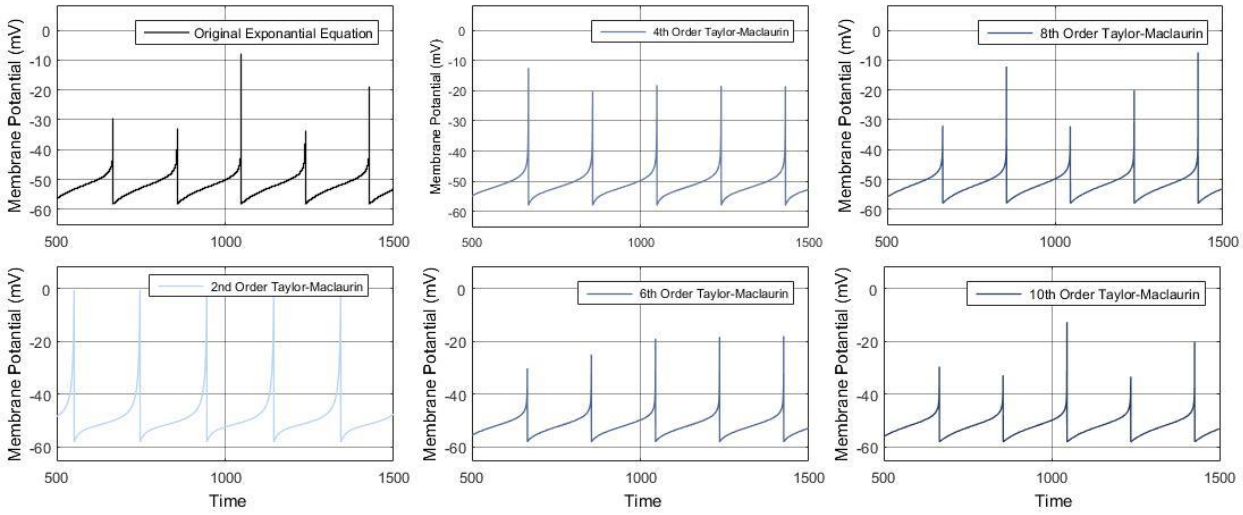
Table 2. Error calculation results for Taylor- Maclaurin Serial Expansion based ADEX Neuron Model

Characteristic Dynamic	2nd Order Taylor-Maclaurin Series Expansion			3rd Order Taylor-Maclaurin Series Expansion			4th Order Taylor-Maclaurin Series Expansion		
	RMS Error	Correlation	Phase Error	RMS Error	Correlation	Phase Error	RMS Error	Correlation	Phase Error
Regular Spiking	14.8123	0.0031	0.4903	9.8007	0.0054	0.3071	8.5729	-0.0022	0.2732
Tonic Spiking	8.2946	0.022	0.1001	NaN*	NaN*	NaN*	3.5627	0.0527	0.0587
Intrinsically Bursting	5.9038	0.0278	0.1307	NaN*	NaN*	NaN*	3.1829	0.4271	0.0825
Bursting	12.5658	0.0036	0.2956	8.3172	0.037	0.3039	6.0215	0.0741	0.2809
Inhibition Spiking	11.6437	0.1014	0.29	NaN*	NaN*	NaN*	6.3721	0.1221	0.1869
Inhibition Bursting	8.253	0.351	0.3741	NaN*	NaN*	NaN*	4.5509	0.2711	0.4002
Irregular Spiking	9.236	-0.0012	0.3037	5.0977	-0.0101	0.2765	3.9316	0.033	0.2854
Characteristic Dynamic	**5th Order Taylor-Maclaurin Series Expansion**			**6th Order Taylor-Maclaurin Series Expansion**			**7th Order Taylor-Maclaurin Series Expansion**		
	RMS Error	Correlation	Phase Error	RMS Error	Correlation	Phase Error	RMS Error	Correlation	Phase Error
Regular Spiking	7.6211	0.0097	0.243	7.8061	0.0286	0.2441	7.4223	0.0321	0.237
Tonic Spiking	NaN*	NaN*	NaN*	1.7611	0.8759	0.0372	3.0816	0.6367	0.0439
Intrinsically Bursting	2.5757	0.602	0.0522	1.7762	0.7857	0.0289	1.7723	0.7933	0.0224
Bursting	4.1496	0.5419	0.2092	0.1756	0.7233	0.1428	2.9733	0.7589	0.105
Inhibition Spiking	NaN*	NaN*	NaN*	5.7537	0.1735	0.1646	NaN*	NaN*	NaN*
Inhibition Bursting	NaN*	NaN*	NaN*	3.5862	0.4993	0.3401	NaN*	NaN*	NaN*
Irregular Spiking	3.6423	0.353	0.2944	3.4187	0.0606	0.2957	3.2985	0.0668	0.2897
Characteristic Dynamic	**8th Order Taylor-Maclaurin Series Expansion**			**9th Order Taylor-Maclaurin Series Expansion**			**10th Order Taylor-Maclaurin Series Expansion**		
	RMS Error	Correlation	Phase Error	RMS Error	Correlation	Phase Error	RMS Error	Correlation	Phase Error
Regular Spiking	7.4141	0.0245	0.2347	7.3945	0.0247	0.2347	7.5104	0.0536	0.2315
Tonic Spiking	2.0661	0.8388	0.0251	2.3628	0.7887	0.0265	1.3587	0.9263	0.0147
Intrinsically Bursting	1.7032	0.8129	0.02	0.1126	0.9994	0.0049	0.0562	0.9999	0.0034
Bursting	2.4044	0.8267	0.0668	2.2663	0.8493	0.0506	0.2353	0.9985	0.0101
Inhibition Spiking	6.3542	-0.0342	0.1748	NaN*	NaN*	NaN*	5.0804	0.3368	0.1248
Inhibition Bursting	2.5547	0.7503	0.2696	NaN*	NaN*	NaN*	1.5395	0.9122	0.1906
Irregular Spiking	3.24	0.0533	0.2939	3.2104	0.0966	0.276	3.0803	0.1197	0.2648

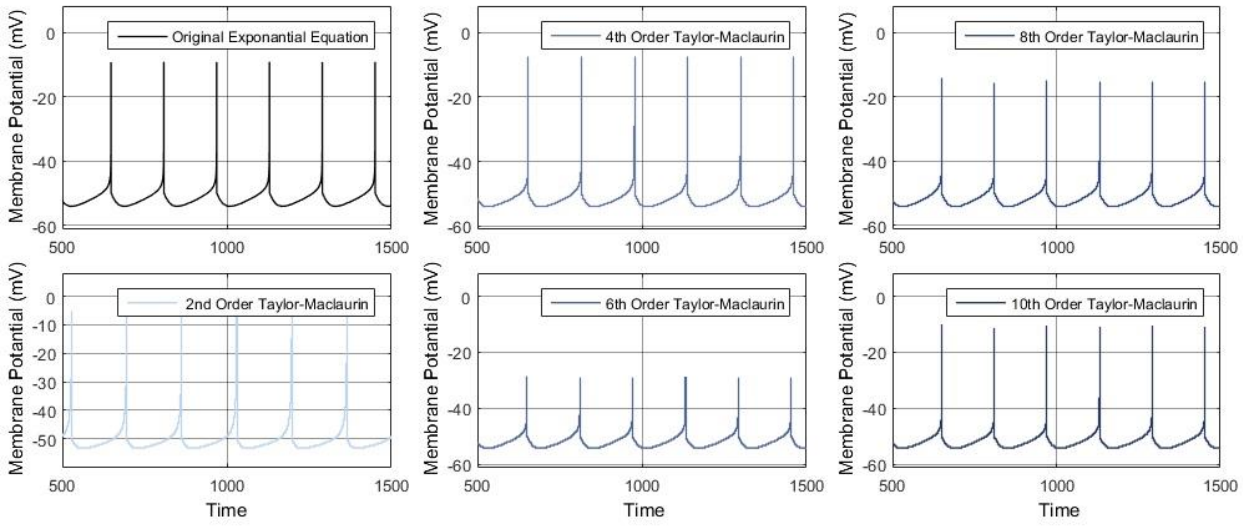
*Not a Number


Original Exponantial Expresion
4th Order Taylor-Maclaurin
8th Order Taylor-Maclaurin
2nd Order Taylor-Maclaurin
6th Order Taylor-Maclaurin
10th Order Taylor-Maclaurin
Membrane Potantial (mV)
Time

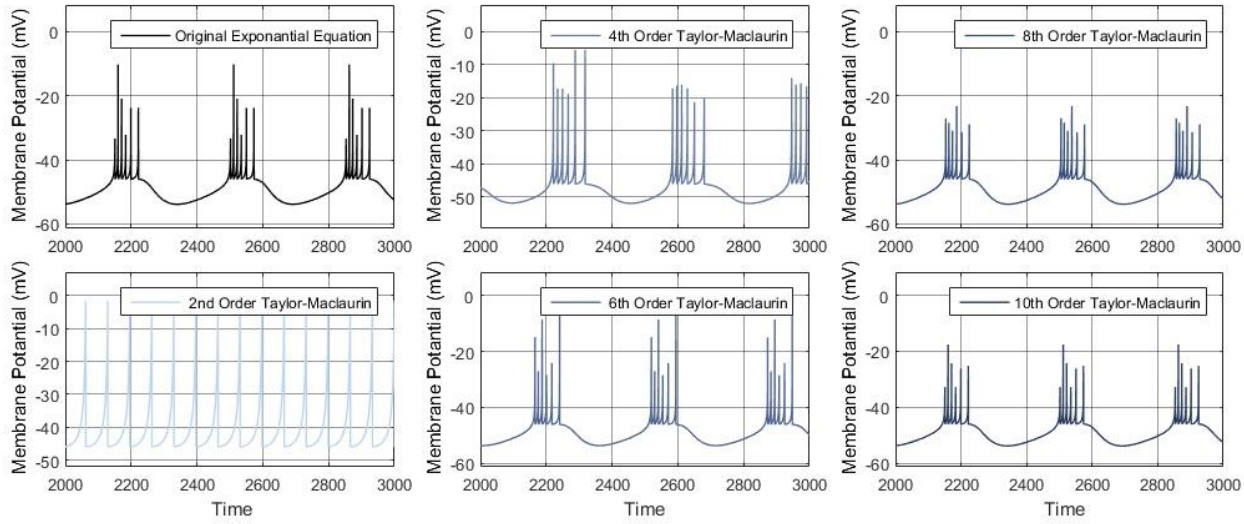
(a)


Original Exponantial Equation
4th Order Taylor-Maclaurin
8th Order Taylor-Maclaurin
2nd Order Taylor-Maclaurin
6th Order Taylor-Maclaurin
10th Order Taylor-Maclaurin
Membrane Potantial (mV)
Time

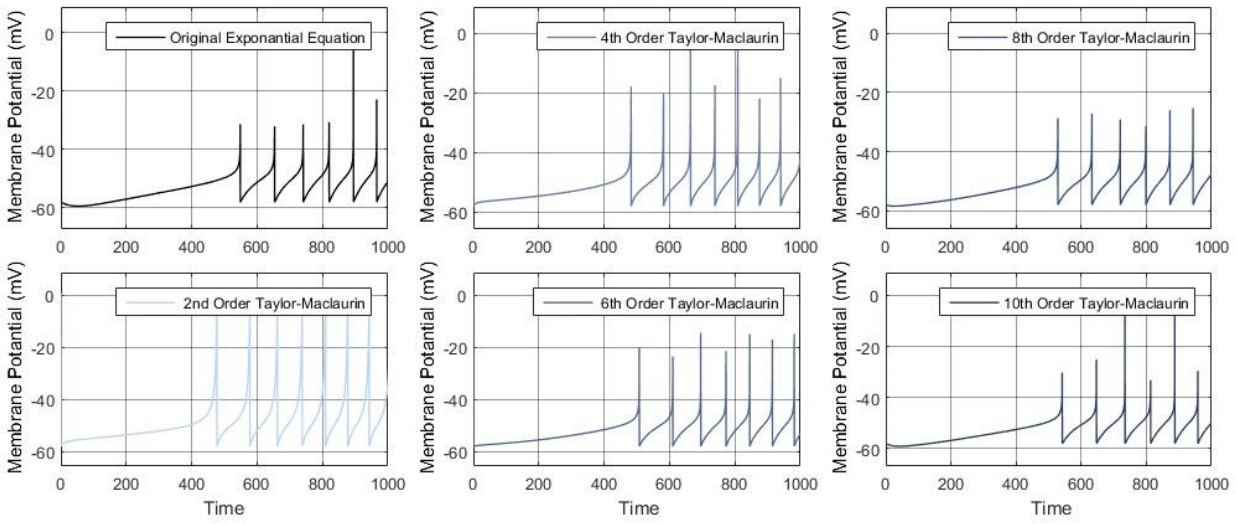
(b)


Original Exponantial Equation
4th Order Taylor-Maclaurin
8th Order Taylor-Maclaurin
2nd Order Taylor-Maclaurin
6th Order Taylor-Maclaurin
10th Order Taylor-Maclaurin
Membrane Potantial (mV)
Time

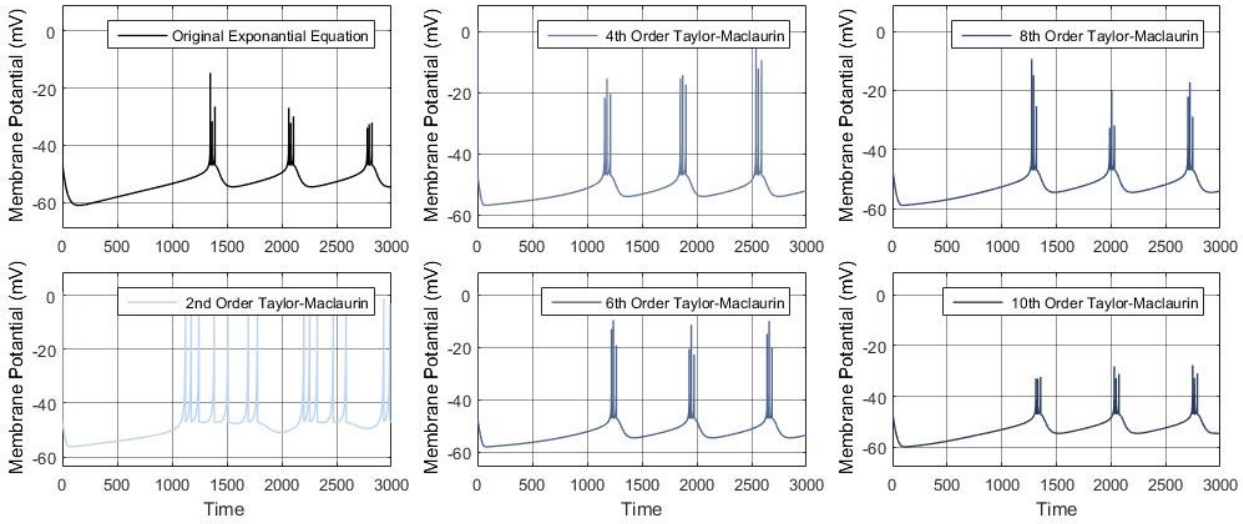
(c)


Original Exponantial Equation
4th Order Taylor-Maclaurin
8th Order Taylor-Maclaurin
2nd Order Taylor-Maclaurin
6th Order Taylor-Maclaurin
10th Order Taylor-Maclaurin
Membrane Potantial (mV)
Time

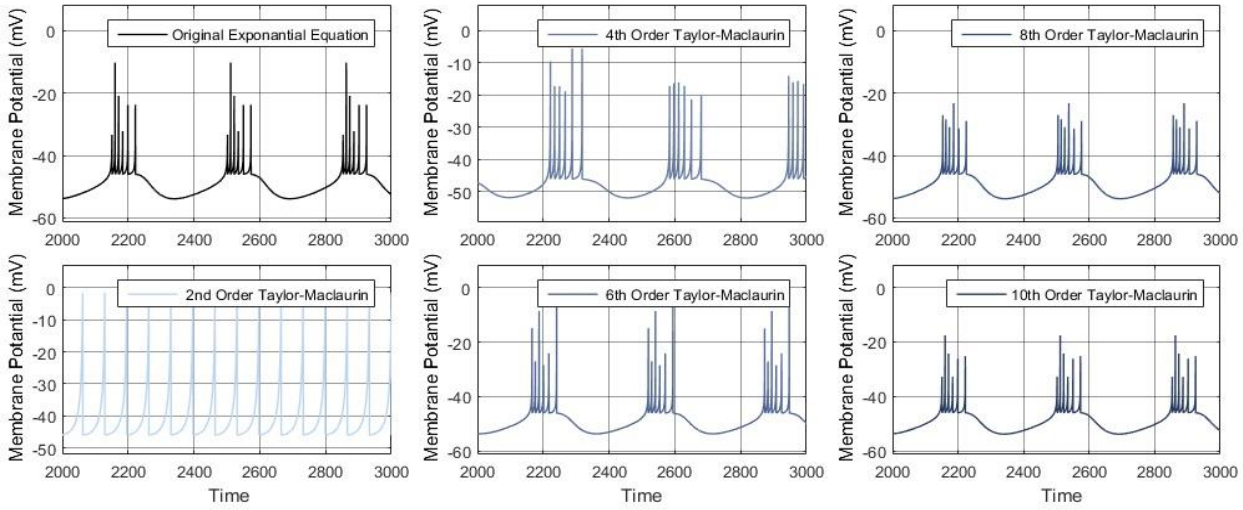
(d)


Original Exponantial Equation
4th Order Taylor-Maclaurin
8th Order Taylor-Maclaurin
2nd Order Taylor-Maclaurin
6th Order Taylor-Maclaurin
10th Order Taylor-Maclaurin
Membrane Potantial (mV)
Time

(e)


Original Exponantial Equation
4th Order Taylor-Maclaurin
8th Order Taylor-Maclaurin
2nd Order Taylor-Maclaurin
6th Order Taylor-Maclaurin
10th Order Taylor-Maclaurin
Membrane Potantial (mV)
Time

(f)



(g)

Figure 1. The numerical simulation results, which are includes the membrane potentials in millivolts versus time in milliseconds of the ADEX neuron models, for a) the regular spiking, b) the tonic spiking, c) the intrinsic bursting, d) the bursting, e) the inhibition spiking, f) the inhibition bursting, and g) the irregular spiking neuronal behaviors.

From Table 2, as the operands of the series expansion increases, the error values decrease. This result is in line with the expected output. However, some uncalculated results (Not a Numbers-NaNs) are founded in the odd-order operands of the Taylor series and this expression occurs when a mathematically undefined or invalid operation is performed in the calculations. Accordingly, it is an incomplete practice to evaluate the results by calculating just the error values. For this reason, the numerical simulations studies have also been made in here. Their results allow the observation of both the modified ADEX neuron model and the original one, simultaneously. In these simulations, the original and modified ADEX neuron models are discretized by using the Euler method for $\Delta h = 0.1$ step size. After that, the initial conditions of both models are set to the same values. Their parameters are set to the values in Table 1. The exponential function of the original ADEX neuron model are converted to second, fourth, sixth, eighth and tenth-order Taylor expansions and the numerical simulations are executed these modified structures. The numerical simulation results in MATLAB™ Simulink are presented in Figures 1.a-e for the regular spiking, the tonic spiking, the intrinsic bursting, the bursting, the inhibition spiking, the inhibition bursting, and the irregular spiking neuronal behaviors, respectively.

According to both these error calculations in Table 2 and the numerical simulation results in Figure 1, the fourth order expansion of the Taylor series is suitable for the simplification process of this exponential nonlinear expression. As an efficiency verification of this conversion, the ADEX neuron model, which consists of four operands-Taylor series instead of the exponential function, is implemented with Field Programmable Gate Array (FPGA) platform.

3 The digital implementation of the fourth-order taylor expansion-based ADEX neuron model with FPGA device

An electronic signal has a spatiotemporal quantity and it is continuous (analog) or discrete (digital) characteristic. Although the real world has an analog nature, most of today's information processing technologies are based on digital systems. The membrane potentials measured from real biological neurons are also in analog form. However, the usage of digital equipment is also common when transferring the biological patterns to bio-inspired systems. In this transfer process, it is not always possible to directly perform some continuous form defined nonlinear functions with digital equipment. Thus, it is tried to make these nonlinear terms suitable for digital systems. As mentioned before, the usage of the comprehensive conversions such as the Taylor series is a source of inspiration for further studies.

The modifying process of the exponential function in the ADEX with the Taylor series has been discussed in the previous section. The FPGA-based realization details of the ADEX neuron model defined by the Taylor series element are presented in this section. The FPGA device is a prominent hardware with the following features in the literature: i) ability to process in parallel, ii) re-programmability, iii) reaching high frequencies, iv) enable hardware update with software, and v) resource usage efficiency, etc. Here, the ADEX neuron model is realized by using the SPARTAN-3AN board produced by XILINX™ Company [49]. The System Generator for DSP tool, which allows programming visually, has been used and the calculations have been executed by the fixed-point arithmetic Q (32, 18). A configuration for the ADEX neuron model built on this tool is shown in Figure 2.

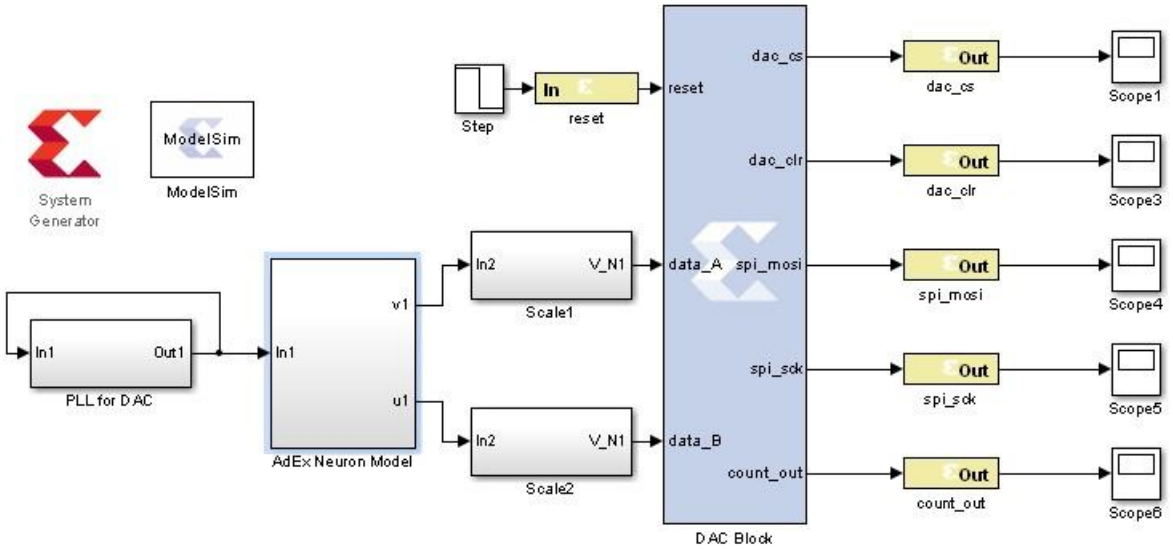


Figure 2. A configuration for the ADEX neuron model built on the System Generator for DSP tool.

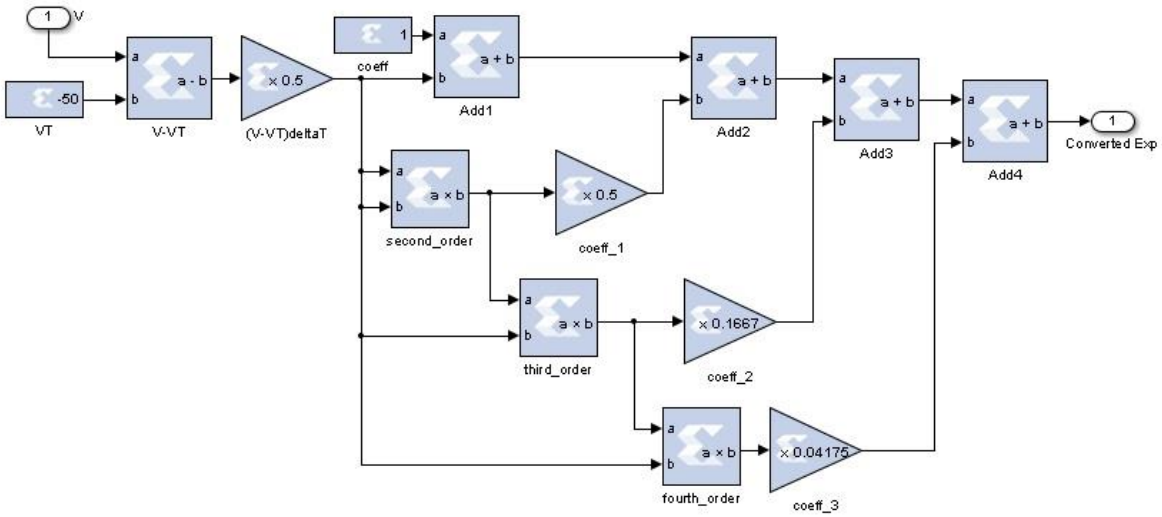
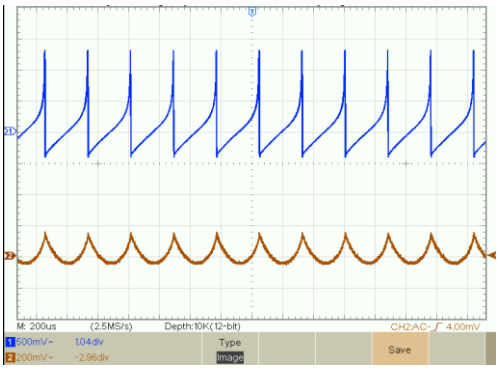
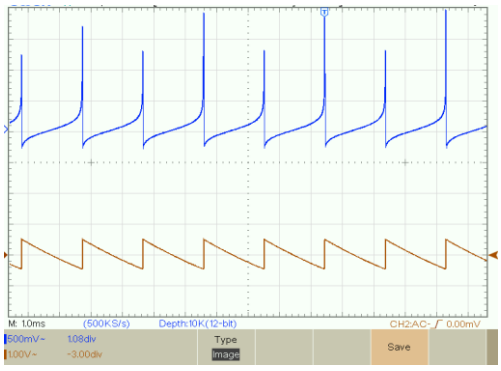


Figure 3. The used predefined-blocks in the System Generator for DSP tool for conversion the exponential function to the fourth-order Taylor series expansion.



(a)



(b)

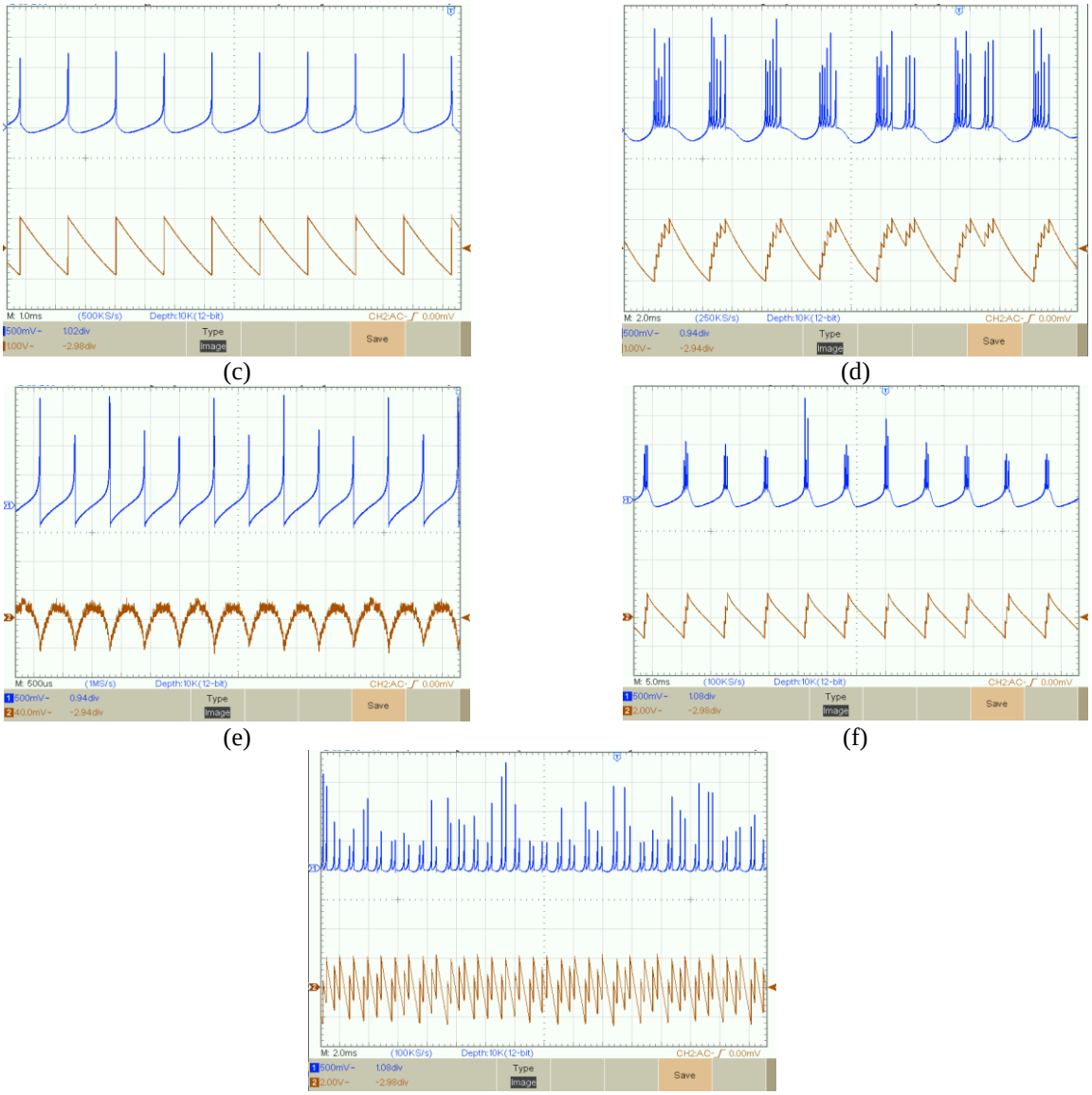


Figure 4. The realization results of the ADEX on FPGA, which is constructed the fourth-order Taylor series, for a) the regular spiking, b) the tonic spiking, c) the intrinsic bursting, d) the bursting, e) the inhibition spiking, f) the inhibition bursting, and g) the irregular spiking neuronal behaviors.

The predefined-blocks, which are used to perform the exponential function conversion to the fourth-order Taylor series expansion, are presented in Figure 3. After the constructed model in Figure 2 has been converted to VHDL, this model has been transferred to the FPGA board. The obtained outputs have been measured through a digital-analog convertor (DAC) module. The FPGA-based implementation results of the modified ADEX neuron model are recorded by an oscilloscope and they are shown in Figure 4. The experimental implementation results are given in Figures 4.a-e for the regular spiking, the tonic spiking, the intrinsic bursting, the bursting, the inhibition spiking, the inhibition bursting, and the irregular spiking neuronal behaviors, respectively. In Figures 4.a-e, the top pattern is the (V) potential and the bottom pattern is the (ω) adaptation variable.

The exponential expression of the ADEX neuron model has been built by utilizing from the Taylor series expansion for realization easiness on digital platform. As a verification of efficiency of this conversion, the ADEX neuron model, which consists of four operands-Taylor series instead of the exponential function, is realized with FPGA platform. As seen from the results in Figure .4, this process has been completed successfully.

4 Conclusion

This study focuses on the digital device based-implementation of the ADEX neuron model. There are several studies on the implementation of this neuron model in the literature. However, the proposed approach in here constitutes an inspiration for the further studies in terms of providing a comprehensive approach. In fact, the nonlinear exponential term in the definition of the ADEX has been expanded to the Taylor- Maclaurin series and this serial expansion can be applied most of any other nonlinear systems. In this context,

the serial expansions of the nonlinear term of the ADEX have been continued until the tenth term. In this process, the amplitude error, the phase error and the correlation analysis between the original and the modified models have been calculated and the calculation results have been recorded to tables. Moreover, the numerical simulation responses of the original and the modified models have been gotten for seven characteristic dynamic patterns of this neuron model. Excess term usage in the serial expansion means the excessive hardware usage. For this reason, the optimum serial expansion degree has been determined as fourth expansion by depending on the numerical simulation observations as well as the calculated errors and correlation results. In the last part of this study, the FPGA-based implementations of the modified ADEX neuron model have been performed for determining the efficiency of this conversion process in a digital system and the fourth-order Taylor expansion have been used in these implementations. The results of the obtained real-time signals have been presented by using an oscilloscope. The element consumption results and the map report are as follows in these FPGA-based implementations: While 1399 of 11776 the 4-LUT inputs are used (11%), 695 of 5888 the SLICEs are occupied (16%). Additionally, 12 of 20 the MULT18X18SIO multipliers are used (60%) and the maximum delay in the system is 1.058 nanoseconds.

Conflict of interest: The authors declare that they have no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 18%

References

[1] E. M. Izhikevich, Simple model of spiking neurons, in IEEE Transactions on Neural Networks, 14, 6, 1569-1572, 2003, doi: 10.1109/TNN.2003.820440.

[2] Gerstner, Wulfram, and Werner M. Kistler. Spiking neuron models: Single neurons, populations, plasticity. Cambridge University Press, 2002. doi.org/10.1017/CBO9780511815706

[3] Alan L. Hodgkin and Andrew F. Huxley. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. The Journal of physiology, 117,4, 500, 1952. doi: 10.1113/jphysiol

[4] C. Morris, H. Lecar, Voltage oscillations in the barnacle giant muscle fiber. Biophys. J., 35, 193–213, 1981. doi.org/10.1016/S0006-3495(81)84782-0

[5] A. J. Isjpeert, Central Pattern Generators for locomotion control in animals and robots: A review. Neural Networks, 21, 642-653, 2008. doi.org/10.1016/j.neunet.2008.03.014

[6] R. FitzHugh, Mathematical models for excitation and propagation in nerve, Biological Engineering, H.P. Schawn (Ed.), New York: McGraw-Hill, 1- 85, 1969.

[7] J. L. Hindmarsh, R. M. Rose, A model of neuronal bursting using three couple first order differential equations, Proc. R. Soc. Lond. Biol. Sci., 22,1222, 87-102, 1984. doi.org/10.1098/rspb.1984.0024

[8] H. R. Wilson, J. D. Cowan, Excitatory and inhibitory interactions in localized populations of model neurons, Biophysical Journal, 12,1, 1-24,1972. doi.org/10.1016/S0006-3495(72)86068-5

[9] R. Jolivet, A. Rauch, H. R. L. Lüscher, Gerstner, W. Integrate and-Fire models with adaptation are good enough: Predicting spike times under random current injection, Adv. Neural Inf. Proces. Syst., 18, 595–602, 2005. doi.org/10.1101/2024.09.03.610998

[10] M. G. F. Fuortes, F. Mantegazzini, Interpretation of the repetitive firing of nerve cells, J. Gen. Physiol., 45,6, 1163–1179, 1962. doi.org/10.1085/jgp.45.6.1163

[11] A. Treves, Mean-field analysis of neuronal spike dynamics, Network: Comput. Neural Syst., 4,3, 259–284, 1993. doi.org/10.1088/0954-898X/4/3/002

[12] P. E. Latham, B. J. Richmond, P. G. Nelson, S. Nirenberg, Intrinsic dynamics in neuronal networks, J. Neurophysiol, 83,2, 808–827, 2000. doi.org/10.1152/jn.2000.83.2.808

[13] M. J. Richardson, N. Brunel, V. Hakim, From subthreshold to firing-rate resonance, J. Neurophysiol., 89,5, 2538–2554, 2003. doi.org/10.1152/jn.00955.2002

[14] R. Naud, N. Marcille, C. Clopath, W. Gerstner, Firing patterns in the adaptive exponential integrate-and-fire model, Biol. Cybern., 99, 4–5, 335–347, 2008. doi.org/10.1007/s00422-008-0264-7

[15] H. Soleimani, A. Ahmadi, M. Bavandpour, Biologically inspired spiking neurons: Piecewise linear models and digital implementation, IEEE Trans. Circuits Syst. I: Regular Papers, 59,12, 2994–3001, 2012. doi: 10.1109/TCSI.2012.2206463

[16] Z. Jie, Y. Baoquan, Mixed signal integrated circuit design for integrate-and-fire spiking neurons, Circuits Syst. Signal Process., 42, 27–46, 2023. doi.org/10.1007/s00034-022-02131-2

[17] N.A. Kant, M. R. Dar, F. A. Khanday, et al. Ultra-low-voltage integrable electronic realization of integer- and fractional-order liao's chaotic delayed neuron model, Circuits Syst. Signal Process., 36, 4844–4868, 2017. doi.org/10.1007/s00034-017-0615-5

[18] Y. Heo, H. Song, Circuit modeling and implementation of a biological neuron using a negative resistor for neuron chip, BioChip J., 6, 17–24, 2012. doi.org/10.1007/s13206-012-6103-x

[19] S. B. Furber, S. Temple, A. D. Brown, High-performance computing for systems of spiking neurons, In AISB'06 Workshop on GC5: Architecture of Brain and Mind, 2, 29–36, 2006.

[20] K. Yamazaki, V. K. Vo-Ho, D. Bulsara, N. Le, Spiking neural networks and their applications: A Review, Brain Sciences, 12,7, 863, 2022. doi.org/10.3390/brainsci12070863

[21] Ö. Erdener, S. Ozoguz, A new neuron and synapse model suitable for low power VLSI implementation, Analog Integr. Circ. Sig. Process., 89, 749–770, 2016. doi.org/10.1007/s10470-016-0773-6

[22] M. Glover, A. Hamilton, L. S. Smith, Analogue VLSI leaky integrate-and-fire neurons and their use in a sound analysis system, Analog Integr. Circ. Sig.

Process, 30, 91–100, 2002. doi.org/10.1023/A:1013747426448
[23] E. P. Frady, S. Sanborn, S. B. Shrestha, et al., Efficient neuromorphic signal processing with resonator neurons, J. Sign. Process. Syst., 94, 917–927, 2022. doi.org/10.1007/s11265-022-01772-5
[24] Y. Khakipoor, H. B. Bahar, G. Karimian, An efficient analysis of FitzHugh-Nagumo circuit model, Analog Integr. Circ. Sig. Process., 110, 385–393, 2022. doi.org/10.1007/s10470-021-01947-3
[25] S. Millner, A. Grübl, K. Meier, J. Schemmel, M. O. Schwartz, A VLSI implementation of the adaptive exponential integrate-and-fire neuron model, Adv. Neural Inf. Process. Syst., 1642–1650, 2010. doi.org/10.4249/scholarpedia.8427
[26] O. Sharifipoorand, A. Ahmadi, An analog implementation of biologically plausible neurons using CCII building blocks, Neural Network, 36, 129-135, 2012. doi.org/10.1016/j.neunet.2012.08.017
[27] Z. T. Njitacke, T. F. Fozin, S. S. Muni, J. Awrejcewicz, J. Kengne, Energy computation, infinitely coexisting patterns and their control from a Hindmarsh–Rose neuron with memristive autapse, Circuit implementation, AEU- Int. J. Electron. Commun., 155, 154361, 2022. doi.org/10.1016/j.aeue.2022.154361
[28] T. Matsubara, H. Torikai, T. Hishiki, A generalized rotate-and-fire digital spiking neuron model and its on-FPGA learning, IEEE Trans. Circuits Syst. II: Express Briefs, 58,10, 677–681, 2011. doi.org/10.1109/TCSII.2011.2161705
[29] A. Grübl, S. Billaudelle, B. Cramer, et al., Verification and design methods for the brainscales neuromorphic hardware system, J. Sign. Process. Syst., 92, 1277–1292, 2020. doi.org/10.1007/s11265-020-01558-7
[30] S. Majidifar, M. Hayati, M. R. Malekshahi, D. Abbott, FPGA implementation of memristive Hindmarsh–Rose neuron model: Low cost and high-performing through hybrid approximation, AEU- Int. J. Electron. Commun., 154968, 2023. doi.org/10.1016/j.aeue.2023.154968
[31] J. Toubouland, R. Brette, Dynamics and bifurcations of the adaptive exponential integrate-and-fire model, Biol. Cybern., 99,4–5, 319–334, 2008. doi.org/10.1007/s00422-008-0267-4
[32] H. Soleimani, A. Ahmadi, M. Bavandpour, Biologically inspired spiking neurons: piecewise linear models and digital implementation, IEEE Trans. Circuits. Syst. I Regul. Pap., 59,12, 2991-3004, 2012. doi.org/10.1109/TCSI.2012.2206463
[33] N. Korkmaz, İ. Öztürk, A. Kalınlı, R. Kılıç, A Comparative study on determining nonlinear function parameters of the Izhikevich neuron model, J. Circuits, Syst. Comput., 27,10, 2018. doi.org/10.1109/TCSI.2012.2206463
[34] M. Hayati, M. Nouri, D. Abbott, S. Haghiri, Digital multiplierless realization of two-coupled biological hindmarsh–rose neuron model, IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs, 63,5, 463-467, 2016. doi.org/10.1109/TCSII.2015.2505258
[35] N. Korkmaz, İ. Öztürk, R. Kılıç, The investigation of chemical coupling in a HR neuron model with reconfigurable implementations, Nonlinear Dyn., 86,3, 1841-1854, 2016. doi.org/10.1007/s11071-016-2996-6
[36] S. Gomar, A. Ahmadi, Digital multiplierless implementation of biological Adaptive-Exponential neuron model, IEEE Trans. Circuits. Syst. I Regul. Pap., 61,4, 1206-1219, 2014. doi.org/10.1109/TCSI.2013.2286030
[37] S. Haghiri, A. Ahmadi, A novel digital realization of ADEX neuron model. IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs, 67,8, 1444-1448, 2020. doi.org/10.1109/TCSII.2019.2938180
[38] E. Jokar, H. Abolfathi, A. Ahmadi, M. Ahmadi, An efficient uniform-segmented neuron model for large-scale neuromorphic circuit design: simulation and FPGA synthesis results, IEEE Trans, Circuits Syst. I Regul. Pap., 66,6, 2336-2349, 2019. doi.org/10.1109/TCSI.2018.2889974
[39] J. Touboul, R. Brette, Dynamics and bifurcations of the adaptive exponential integrate-and-fire model, Biol. Cybern., 99,4, 319-334, 2008. doi.org/10.1007/s00422-008-0267-4
[40] A. Başargan, A synaptic coupling for the adaptive exponential integrate and fire (ADEXI&F) neuron model with circuit simulations, M. Sc. Thesis, Istanbul Technical University, 65, 2013.
[41] J. J. Duistermaat, J. A. C. Kolk, Taylor expansion in several variables. in: distributions, Cornerstones, Birkhäuser Boston, 2010. doi.org/10.1007/978-0-8176-4675-2_6
[42] M. Tuna, A novel secure chaos-based pseudo random number generator based on ANN-based chaotic and ring oscillator: design and its FPGA implementation, Analog Integr. Circ. Sig. Process., 105,167–181, 2020. doi.org/10.1007/s10470-020-01703-z
[43] M. Greenberg, Advanced engineering mathematics. 2nd ed., Prentice Hall, ISBN 0-13-321431-1, 1998.
[44] C. Willmott, K. Matsuura, On the use of dimensioned measures of error to evaluate the performance of spatial interpolators, Int. J. Geogr. Inf. Sci., 20, 89–102, 2006. doi.org/10.1080/13658810500286976
[45] Z. Li, Exponential stability of synchronization in asymmetrically coupled dynamical networks, Chaos Interdiscip. J. Nonlinear. Sci., 18,2, 023124, 2008. doi.org/10.1063/1.2931332
[46] J. W. Shuai, D. M. Durand, Phase synchronization in two coupled chaotic neurons, Phys. Lett. A, 264,4, 289–297, 1999. doi.org/10.1016/S0375-9601(99)00816-6
[47] N. J. Gogtay, U. M. Thatte, Principles of correlation analysis, Journal of the Association of Physicians of India, 65,3, 78-81, 2017.
[48] www.xilinx.com , Accessed 24.10.2024

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 1001-1013

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Machine learning-based temporal change detection of land use and land cover changes in the Tunçbilek open pit coal mine region using Planetscope imagery

Planetscope görüntüleri kullanılarak Tunçbilek açık ocak kömür madeni bölgesinde arazi kullanım ve örtü değişikliklerinin makine öğrenmesi tabanlı zamansal değişim tespiti

Recep Uğur Acar[1,*], Enes Zengin[2], Ali Samet Öngen[3]

[1,3] *Kütahya Dumlupınar University, Geological Engineering Department, 43140, Kütahya, Türkiye*
[2] *İstanbul Technical University, Geological Engineering Department, 34469, İstanbul, Türkiye*

Abstract

This study investigates land use and land cover (LULC) changes in the Tunçbilek open-pit coal mine and its surroundings, a region experiencing intense mining activity in western Türkiye. Understanding LULC dynamics is crucial for assessing the long-term environmental impacts of surface mining operations and supporting sustainable land management. High-resolution PlanetScope imagery from 2016 and 2021 was used in conjunction with two supervised machine learning algorithms Maximum Likelihood Classification (MLC) and Support Vector Machine (SVM) to detect temporal changes in six land cover classes. The results show that SVM outperformed MLC in classification accuracy. The kappa values for MLC were 0.73 (2016) and 0.72 (2021), whereas SVM achieved 0.87 and 0.84, respectively. SVM also provided higher user and producer accuracy rates, particularly for the forest and planted classes. Between 2016 and 2021, notable land cover transitions were observed, including a 6.83% increase in cultivated lands and a 7.9% decrease in barren land. The mining area itself expanded by approximately 1.39%. These results highlight the effectiveness of machine learning-based remote sensing methods in monitoring LULC changes and contribute to a better understanding of the environmental impacts of mining activities in complex and sensitive landscapes.

Keywords: Change detection, Machine learning, Mining site, MLC, Planet Scope, Remote sensing, SVM

Öz

Bu çalışma, Batı Anadolu'da yoğun madencilik faaliyetlerinin yürütüldüğü bir bölge olan Kütahya'daki Tunçbilek açık ocak kömür madeni ve çevresindeki arazi kullanım ve örtü (LULC) değişimlerini incelemektedir. Yüzey madenciliği operasyonlarının uzun vadeli çevresel etkilerinin değerlendirilmesi ve sürdürülebilir arazi yönetiminin desteklenmesi açısından LULC dinamiklerinin anlaşılması büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla, 2016 ve 2021 yıllarına ait yüksek çözünürlüklü PlanetScope uydu görüntüleri kullanılmış ve zamansal değişimlerin tespiti için Maksimum Olabilirlik Sınıflandırması (MLC) ile Destek Vektör Makineleri (SVM) olmak üzere iki denetimli makine öğrenme algoritması uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, sınıflandırma doğruluğu açısından SVM, MLC'ye kıyasla daha yüksek performans göstermiştir. MLC için kappa katsayıları 2016 yılında 0.73, 2021 yılında ise 0,72 olarak belirlenirken; SVM için bu değerler sırasıyla 0.87 ve 0.84 olarak hesaplanmıştır. Özellikle orman ve ekili alan sınıflarında SVM, kullanıcı ve üretici doğruluklarında daha yüksek başarı elde etmiştir. 2016–2021 yılları arasında tarım alanlarında %6.83'lük bir artış, çıplak toprak alanlarında ise %7.9'luk bir azalma gözlemlenmiştir. Madencilik alanı ise yaklaşık %1.39 oranında genişlemiştir. Bu bulgular, LULC değişimlerinin izlenmesinde makine öğrenmesi tabanlı uzaktan algılama yöntemlerinin etkinliğini ortaya koymakta ve karmaşık, hassas peyzajlarda madencilik faaliyetlerinin çevresel etkilerinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Değişim tespiti, Makine öğrenmesi, Maden sahası, MLC, Planet Scope, SVM, Uzaktan algılama

1. Introduction

Today's rapid economic and technological development has led to an increase in the demand for both mineral resources and energy, which in turn has led to the rise in the market for underground resources [1-5]. Coal from underground resources is one of the most critical energy resources due to its low cost and abundance compared to other resources both in the world and in our country, especially in terms of electricity energy demand [1, 6-8]. Two main mining methods are employed for the extraction of coal and other mineral resources: underground and surface mining methods [9-12]. Coal mining is commonly carried out using open pit mining, which is carried out on the earth's surface [13-14]. The extraction of coal through open-pit mining inevitably entails the removal of overlying rock and soil material. This process results in alteration of the

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ugur.acar@dpu.edu.tr (R. U. Acar)
Geliş / Received: 13.01.2025 Kabul / Accepted: 22.05.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1619090

surrounding vegetation, water bodies and geography, and some instances, it also affects settlements [15-21]. Given the above impacts of opencast mining activities, Mining sites must be continuously monitored. This is vital for the sustainability of mining operations as it allows a precise understanding of the long-term environmental and land cover impacts and how changes to the surface are shaped over time [22]. This monitoring process enables the extent of soil erosion, vegetation loss, water resources status, and land use change to be revealed. It can be helpful for early detection of disaster risks such as landslides and subsidence [23]. Therefore, continuous and regular monitoring of these changes is necessary to support sustainable mining practices and minimize potential risks [24].

Traditional mining site monitoring techniques, such as topographic and photogrammetric surveys, are often time- and labour-intensive. Topographic measurements involve collecting elevation and landform data from various points on the site, requiring site visits and detailed measurements. Similarly, photogrammetric studies aim to create three-dimensional terrain models using aerial or drone images. However, data collection and analysis processes for these techniques could be more laborious and time-consuming in mining areas with large surface areas. In this context, remote sensing methods utilizing satellite data offer a highly cost-effective and beneficial approach for monitoring land use and land cover (LULC) changes across large geographical areas [22, 24-25]. Land cover refers to the uppermost layer of the Earth's surface, such as water, vegetation, bare soil, urban infrastructure, or any other surface feature [26-28]. In contrast, land use classification aims to define the functional purpose of the land, such as recreation, wildlife habitat, agriculture, and similar uses [27, 29-30]. As natural and semi-natural habitats are continuously subjected to increasing pressure due to anthropogenic activities, monitoring the changes occurring in such areas has become a priority to ensure conservation and sustainable land use practices [31-35]. Quantifying the spatial and temporal patterns of LULC changes and their corresponding consequences is now recognized as a critical area of research in land change science [36].

Mining activities can significantly alter hydrological processes at various scales due to vegetation removal, canopy disruption, and modification of wetlands. The loss of vegetation cover and changes in soil infiltration capacity may considerably increase the flood generation potential of catchments, thereby leading to significant ecological consequences [20]. Furthermore, large-scale changes in surface materials can result degrading of the natural landscape's aesthetic value [35]. The quantitative assessment of such LULC changes plays a crucial role in evaluating and managing the potential impacts of mining operations on natural systems. Among the various methods employed for monitoring open-pit mines, remote sensing-based LULC applications remain the most common and practical approach [37]. Today, various classification methods are used to investigate the temporal dynamics of LULC. In recent years, remote sensing scientists have increasingly adopted machine learning classification algorithms in LULC mapping studies, as these methods have gained significant prominence in the processing of remote sensing data [38]. Machine learning techniques offer potential for the effective and efficient classification of satellite imagery [39-44]. Among the key strengths of machine learning are its ability to process high-dimensional data, map classes with highly complex characteristics, accept diverse input prediction variables, and operate without requiring assumptions about data distributions (i.e., non-parametric behavior) [41]. These techniques have become especially important in LULC mapping due to their capability to handle large volumes of multispectral satellite data with high accuracy and efficiency. Consequently, they are widely used as effective tools in environmental change analyses [41, 45-47]. Beyond improving the detection of subtle environmental changes, these methods also support timely decision-making in sustainable mining operations. Numerous studies conducted both globally and within Türkiye the setting of this research have demonstrated that machine learning methods facilitate more frequent updates and continuous monitoring in dynamic environments such as open-pit mining areas and generally yield high classification accuracies [48-53].

In this study, land use and land cover (LULC) changes in the Tunçbilek open-pit coal mine and its surrounding areas located within the borders of Tavşanlı district in Kütahya province were investigated using high-resolution PlanetScope imagery and supervised machine learning classification algorithms. The study focuses on detecting and analyzing the spatial and temporal surface changes caused by mining activities over five years. While numerous studies have explored LULC changes using remote sensing, limited research has mainly focused on the detailed analysis of the long-term environmental effects of open-pit coal mining in Türkiye using high-resolution PlanetScope satellite imagery combined with advanced machine learning techniques. This presents a significant scientific gap, particularly in the context of sustainable mining and environmental monitoring. By addressing this gap, the present study aims to demonstrate the effectiveness of this integrated approach in mapping and tracking mining-induced land cover transformations with high spatial detail, thereby contributing to the development of more accurate and timely monitoring frameworks for environmentally sensitive regions. Specifically, this study leverages the 3-meter-high spatial resolution of PlanetScope imagery to enable more precise detection of fine-scale surface changes caused by mining activities, offering an advantage over studies using medium-resolution data. Furthermore, by focusing on the Tunçbilek mining site, the research aims to provide an in-depth analysis of the regional environmental impacts, ultimately contributing valuable insights for the development of more effective monitoring systems and sustainable mining practices in similar ecological contexts.

2. Material and methods

Remote sensing (RS) and Geographic Information System (GIS) tools are widely utilized in the mining industry for various purposes, including mineral exploration, modeling and monitoring, mine planning and environmental

impact assessment [22-24]. The methodology of the present study is outlined in Figure 1, commencing with data acquisition and extending to the mapping of the LULC of the mine pit and its immediate surroundings using the MLC and SVM methods. Accuracy assessment was conducted afterwars to validate the classification outcomes and to ascertain which of the two classification mechanisms exhibited superior accuracy.

2.1 Study area

The Tunçbilek open-pit coal mine is located in the Tavşanlı district of Kütahya province, in the northern part of the Aegean region in Western Türkiye, approximately 62 km from the center of Kütahya (Figure 2). The region stands out due to its significant lignite reserves, playing a strategic role in providing energy for industry. Coal production in the Tunçbilek Basin began in 1924, and it was transferred to the Turkish Coal Enterprises (TKİ) in 1940. Today, coal production continues through both open-pit and underground mining methods, with approximately 80% of production coming from open-pit mining [27, 54].

The Tunçbilek mining site has undergone significant environmental pressures due to decades of mining activities, leading to changes in the region's ecological balance. The area surrounding the mine is a mixture of agricultural lands, forests, and settlements, making it essential to monitor the impacts of mining on the land use and land cover (LULC) over a wider geographical area. Furthermore, the fact that open-pit mining predominates in this site results in more pronounced environmental issues, such as surface deformation, vegetation loss, and the alteration of water resources.

In this context, the Tunçbilek mining site and its surrounding area were chosen for this study due to their high potential for monitoring environmental impacts, as well as the fact that this site has been an active and significant open-pit mining operation in Türkiye for many years. Additionally, the limited number of studies conducted in this area presents an opportunity to fill the gap in the literature, thereby enhancing the contributions of this research.

2.2 Data acquisition

To map, identify and evaluate the LULC in Tunçbilek Open Pit and its immediate vicinity, this study employs Planet Scope satellite imagery, which is distinguished by its significant divergence from conventional free satellite data due to its high resolution. Planet operates the largest fleet of Earth observation satellites, with a current total of 200 satellites in orbit. This extensive satellite network provides global coverage, offering high spatial and temporal resolution imagery [55-56]. The Planet Scope constellation presently encompasses three generations of remote sensing satellites: Dove Classic, Dove-R and SuperDoves. The Dove Classic, launched in 2016, carries a 4-band (RGB-NIR) 'PS2' sensor with a ground sampling distance (GSD) of approximately 3.7 m (Table 1).

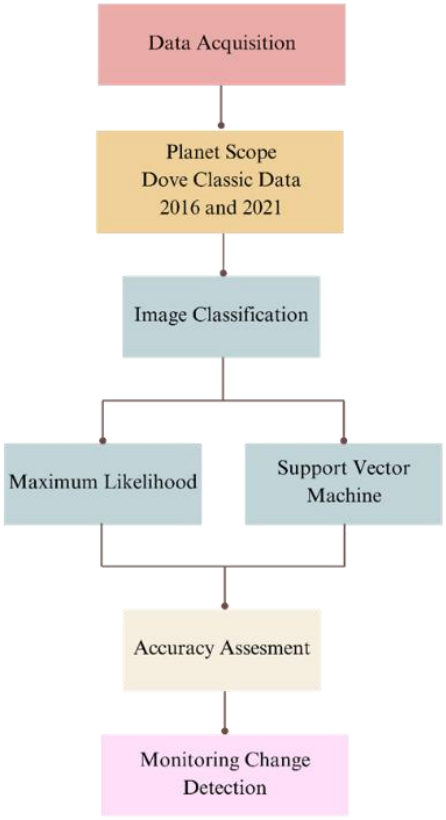


Figure 1. The following flowchart illustrates the general methodology employed in this study

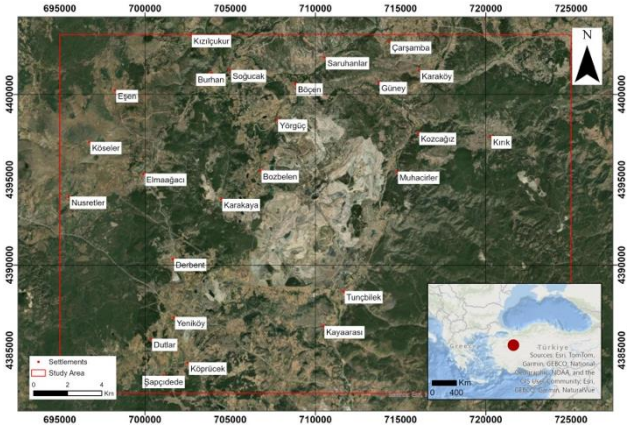


Figure 2. Generalized view of the study area and settlements around its vicinity

These data provided free of charge under an educational use license from Planet Lab Inc. website. Planet Scope satellite data are downloaded in a ready-to-use format in the form of quad-band images (Red, Green, Blue and Near infrared), i.e. without any pre-processing (Figure 3) [29, 56]. These characteristics make Planet Scope satellite data a unique resource for studying heterogeneous urban landscapes (Table 1).

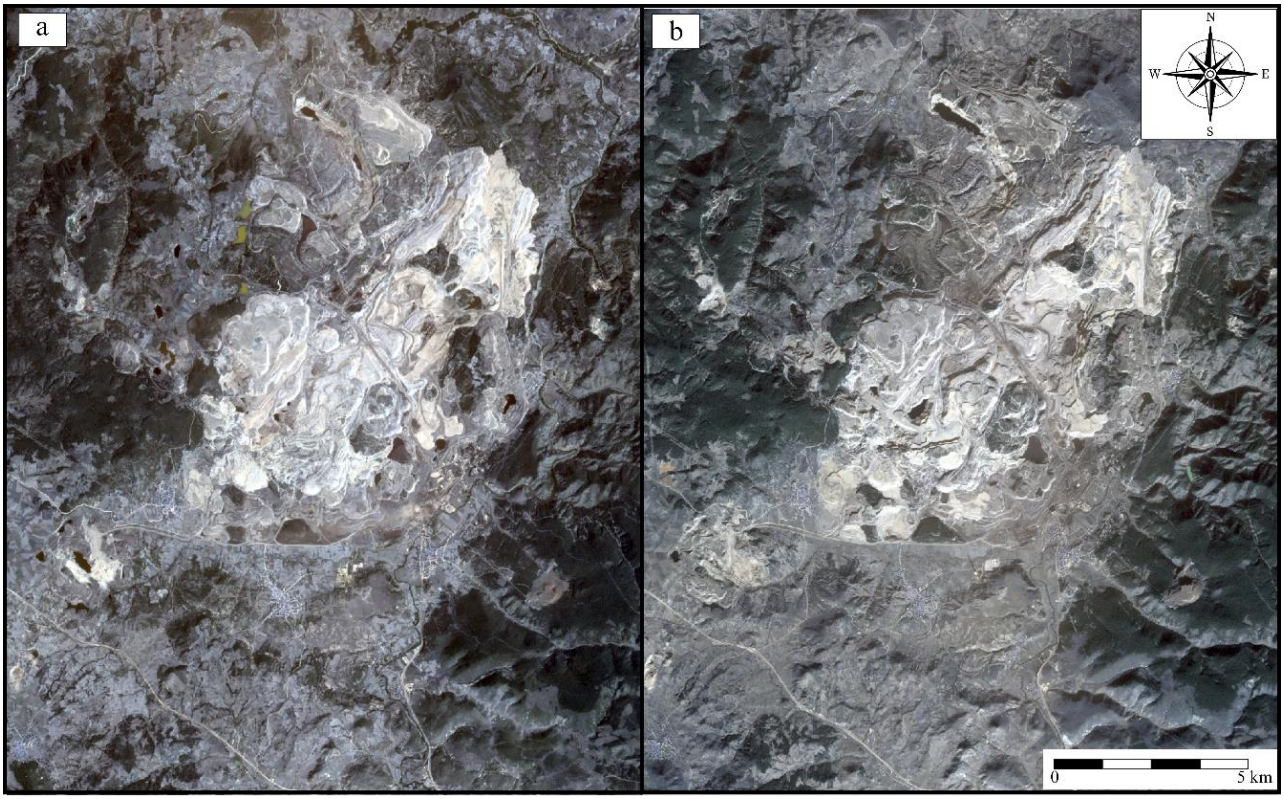


Figure 3. True-color PlanetScope satellite images of the study area acquired in 2016 and 2021, generated using the standard RGB bands.

Table 1. Details of Planet Scope images used in the study

Year	Acquisition Date	Bands Used	Instrument	Spatial Resolution
2021	02/08/2021	Band 1(Blue, 455-515 nm), Band 2 (Green, 500-590 nm), Band 3 (Red, 590-670 nm), Band 4 (Near-Infrared, 780-860 nm)	Dove Classic	3 meters
2016	11/08/2016	Band 1(Blue, 455-515 nm), Band 2 (Green, 500-590 nm), Band 3 (Red, 590-670 nm), Band 4 (Near-Infrared, 780-860 nm)	Dove Classic	3 meters

2.3 Data processing

A four-step approach was used to analyze land use changes in the Tunçbilek Open Pit Coal Mine according to the workflow summarised in Figure 1. The flowchart includes data collection, image classification, accuracy analysis, and evaluation of changes in land use classes over the years. As part of Step 1, PlanetScope images taken half a decade apart from 2016 to 2021 were used, ensuring cloud cover was less than 5%. These images, with a spatial resolution of approximately 3 meters, cover the entire study area. Notably, PlanetScope imagery is delivered as Analysis Ready Data (ARD), having already undergone preprocessing steps such as orthorectification, radiometric calibration, and basic atmospheric correction. Therefore, no additional preprocessing steps were required before the analysis.

LULC classification was performed using ArcGIS Pro by defining training samples for each of the six land cover classes. The classification method employed both Maximum Likelihood Classification (MLC) and Support Vector Machine (SVM) algorithms. This step leveraged the advanced classification tools and capabilities of ArcGIS Pro to optimise accuracy and efficiency, enabling accurate identification of land cover types and changes over time. The classified raster images were first converted to polygon format to facilitate the calculation of each land use area. This conversion allowed for more precise measurements and enabled the identification of specific land use changes over time. Statistical summaries of these changes were then generated, providing insight into the extent and nature of land use dynamics in the study area. In addition, centrally connected polygons were identified and included in the calculations and change analysis to distinguish the open pit mine from other land use features. This methodology allowed for accurate identification and reliable quantification of land use changes.

2.4 Supervised classification

This study employs the Maximum Likelihood Classification (MLC) and Support Vector Machine (SVM) techniques to detect land use and land cover (LULC) changes resulting from mining activities in and around the surface

mining area. MLC is a classical supervised classification algorithm that relies on the statistical distribution of spectral data and has been extensively applied in remote sensing studies, particularly for LULC mapping [57-59]. However, in complex and heterogeneous environments such as open-pit mining areas, spectral overlap between different land cover classes is highly probable, can affect classification accuracy.

To address such complexities, SVM has been introduced as an advanced machine learning algorithm capable of modeling non-linear decision boundaries. It offers strong generalization capabilities and high classification accuracy potential in high-dimensional datasets, such as multi-band satellite imagery. Therefore, this study applies both MLC as a fundamental benchmark and SVM to explore the advantages of machine learning approaches in this specific context.

In supervised image classification, all pixels in raster data are categorized into predefined classes based on spectral characteristics. Both MLC and SVM have been widely utilized for the classification of surface mining areas [22-24, 60-62], with SVM particularly demonstrating improved classification accuracy in various studies [44].

MLC is a widely used supervised classification method applied in the classification of remotely sensed data [63-64]. Training data in MLC is used to generate a class signature based on variance and covariance. The algorithm assumes a normal distribution of each class instance in the multidimensional space, where the number of dimensions is equal to the number of bands in the image [64]. The probability that a pixel belongs to a specific class is computed using the multivariate normal distribution, as shown in Equation (1).

$$D = ln(a_c) - [0.5 * ln(|Cov_c|)] - [0.5x(X - M_c]^T x(Cov_c^{-1})x(X - M_c)] \quad (1)$$

SVM, based on statistical learning theory, is one of the most advanced and highly accurate supervised machine learning techniques, such as object-oriented image classification and fuzzy classifiers [36–38]. SVM is effective in classifying high-dimensional data, making it suitable for complex datasets in land cover, vegetation, and urban studies [65-67]. SVM aims to build a model that predicts the target value of data occurrences in the test set given only their attributes.

The primary objective of SVM is to find an optimal hyperplane that separates classes with the maximum margin. SVM is a non-parametric classifier capable of handling both linearly and non-linearly separable data efficiently [68].

If the training dataset consists of k samples represented as $\{(x_i,y_i)\}$, where $x_i \in \mathbb{R}^n$ and $y_i \in \{-1, +1\}$, the classes are said to be linearly separable if there exists a vector w and a scalar b such that the inequalities given in Equation (2) and Equation (3) define the optimal separating hyperplane.

$$(W\ x\ X_i + b) \geq +1\ overall\ training\ samples\ with\ y_i = +1 \quad (2)$$

$$(W\ x\ X_i + b) \leq -1\ overall\ training\ samples\ with\ y_i = -1 \quad (3)$$

In practical remote sensing applications, it is frequently observed that the available datasets are not always linearly separable. To address this complexity, SVM utilizes kernel functions to project the input data into a higher-dimensional feature space where linear separation becomes feasible. Among the various kernel functions commonly used such as linear, polynomial, sigmoid, and radial basis function (RBF) the RBF kernel is frequently preferred in land use/land cover (LULC) classification tasks due to its strong generalization ability and its effectiveness in handling complex, non-linear class boundaries. Previous studies have reported that the RBF kernel provides reliable and high classification accuracy in a variety of LULC applications [69-74]. For this reason, the RBF kernel was selected in this study. The RBF kernel is defined in Equation (4) as follows:

$$K(X_i, X_j) = exp(-\gamma \parallel X_i - X_j \parallel)^2 \quad (4)$$

The parameter γ, which is specific to the kernel, has been demonstrated to exert a significant influence on the outcome of a single training example. It is evident that a reduced γ value engenders a more refined decision boundary, whilst an augmented one facilitates more intricate separations. The performance of the SVM classifier is contingent on the selection of both γ and the regularization parameter C, which governs the trade-off between achieving a low training error and a large margin. To ensure optimal classification performance, these parameters were fine-tuned using a grid-search method with k-fold cross-validation. Grid-search aims to find the best performing parameter set by systematically testing different combinations of γ and C values within specified ranges. Cross-validation, on the other hand, allows us to estimate the generalization ability of the model by evaluating its performance on different subsets of the data. In the context of multi-class classification problems in this study, the one-against-one strategy was employed, whereby binary classifiers were trained between every possible pair of classes.

In supervised classification, training samples are used to identify each class based on user-defined criteria. This study chose the National Land Cover Database 2011 to identify land cover classes (Table 2) [74-76]. In this study, six land cover classes were selected from the NLCD2011 classification scheme based on their spatial prevalence in the study area and their spectral separability in the PlanetScope imagery. Classes such as wetlands, shrublands, and grasslands were excluded due to their limited representation within the study region and the potential for spectral confusion with other dominant classes at the 3-meter spatial resolution. The selected classes Mining site, Water, Developed, Barren, Forest, and Planted/Cultivated represent the most significant land cover types relevant to the scope and objectives of this study. The classified Planet Scope images are presented in Figure 4, respectively.

Table 2. Land classes and descriptions used in the study

No	Class Name	Description
1	Mining Site	The area where mining activities are carried out
2	Water	Surface water and artificial lakes within the mining site
3	Developed	Settlements and roads
4	Barren	Bare and barren land is not included in the forest class
5	Forest	Tree-covered areas
6	Planted	Arable land

2.5 Accuracy assessment and change detection

After land use classification, it is imperative to evaluate the accuracy and reliability of the classified images to detect and quantify any mapping or classification errors. Various techniques have been developed to evaluate the accuracy of such classifications [24, 77-79]. In this study, confusion matrix, which is a widely used accuracy assessment method, was used and overall (OA), producer (PA) and user accuracies (UA) and *k* coefficient values were calculated for different classes [80-83]. In this study, reference data containing 101 points for six land use classes were randomly generated using ArcGIS Pro software and the method was applied. The estimated and actual reference values of land use maps produced with MLC and SVM methods for the years 2016 and 2021 were compared. Ground truth reference data were derived through visual interpretation of high-resolution Google Earth imagery, which provided temporally corresponding scenes to the PlanetScope data. Reference points were selected based on clearly distinguishable land cover features and cross-checked with prior studies and official land use information to ensure consistency and accuracy. Change detection involves assessing the differences in land cover using images obtained from Planet Scope images on selected dates using the applied classification methods [84]. After spatial change classification, raster data were converted into polygons in ArcGIS to calculate the area covered by each class in the mining site and its vicinity in 2016 and 2021. Then, the change developed in the mining site and its vicinity was calculated and a spatial layer was created to visualize the differences between the two time periods (Figures 3-4).

The accuracy metrics were computed using the following equations Equation (5), (6), (7): The most common method of quantifying agreement is known as the 'one-against-one' (OA) approach. This is indicated by the percentage of pixels that will be correctly categorised. Overall Accuracy (OA) was calculated as:

$$OA = (\sum_{i=1}^{q} X_{ii}/N)\, x100 \tag{5}$$

In this formula, the total number of classes is represented by q, the total number of pixels by N, and the corrected classified pixels, i.e. the diagonal ones, by X_{ii}.

Producer Accuracy (PA) for each class i was calculated as

$$PA = (X_{ii}/N_{i+})x100 \tag{6}$$

$$UA = (X_{ii}/N_{+i})x100 \tag{7}$$

where N_{i+} is the marginal sum of the rows and N_{+i} is the marginal sum of the columns.

The k coefficient, expressed by Equation 8, is used to measure the ratio between the actual and predicted stochastic agreement when the classifier is random.

$$k = (N\sum_{i=1}^{q} X_{ii} - \sum_{i=1}^{q} N_{i+}N_{+i})/(N^2 - \sum_{i=1}^{q} N_{i+}N_{+i}) \tag{8}$$

3. Results and discussion

In this study, two supervised classification methods were evaluated on the 2016 and 2021 datasets as shown in Figure 4 and given in Table 3, and six different land use classes were successfully determined using these techniques.

Firstly, the six distinct land use categories were successfully identified through the implementation of the MLC technique. A subsequent evaluation of the results obtained in both 2016 and 2021 revealed that in 2016, the forest class dominated the study area with 38.36%, while in 2021 barren class became the most dominant class with 35.38%. The mining site class accounted for 13.00% in 2016 and 12.17% in 2021. The distribution of all other land use classes is presented in Table 3. The visual interpretation of the outputs generated by the method revealed that it produced classification errors in both years, in the form of overestimation of agricultural land by confusing it with barren land and slopes within the mine. This error was attributed to the similar spectral reflectance of these classes.

Table 3. Land use and land cover change analysis between 2016 and 2021 based on svm and mlc classification techniques

	MLC (%)			SVM (%)		
Class Name	**2016**	**2021**	**Change**	**2016**	**2021**	**Change**
Mining Site	13.00	12.17	-0.83	13.06	14.45	1.39
Water	0.73	2.22	1.50	2.41	2.38	-0.04
Developed	3.34	1.37	-1.96	2.48	1.20	-1.28
Barren	28.44	35.38	6.94	25.20	17.29	-7.90
Forest	38.36	28.84	-9.52	39.36	40.36	1.00
Planted	16.13	20.00	3.87	17.49	24.31	6.83

When the classification results obtained with the SVM classification method are analyzed, it is seen that the forest class is the most dominant in the field with an area of 39.36% and 40.36% in both 2016 and 2021, respectively (Table 3 and Figure 4). In 2016, the area allocated to coal mining accounted for 13.06% of the total area, while in 2021, this figure increased by 18% over the five-year period, covering approximately 14.5% of the study area. The distribution of other land use classes, including wasteland, surface water, agricultural land and settlements, is presented in Table 3.

Visual interpretation of the classification results revealed higher classification accuracy with the SVM method compared to the MLC method. The inconsistency in classification success can be attributed to various factors such as image quality, image resolution, classification errors, software errors and handling errors. In order to check the accuracy of the maps created after the classification methods, the maps classified with the MLC and SVM methods created for the years 2016 and 2021 were subjected to accuracy analysis. In order to evaluate the accuracy of these classified maps in ArcGIS Pro, after the classification using all classifiers, user accuracy (UA) (also referred to as recall), producer accuracy (PA) (precision), and the *k* coefficient were calculated (Table 4). Although the water class offers variable accuracy percentages in terms of UA and PA for the SVM and MLC classifiers of the methods applied here, respectively, it offers the lowest values together with the developed class, while the forest class generally has the highest accuracy values. The situation experienced in water and forest land may probably be due to the lack of a clear spectral signal that expresses the developed class, which represents the construction areas, and therefore it seems to mix with the mining area slope areas in places. Wetlands, on the other hand, gave low values in accuracy due to the reflections they make and the areas similar to the slopes of the mountains in places. In addition, the *k* coefficient used in the cluster analysis was also calculated. The *k* coefficient is used to measure the ratio between the actual and predicted stochastic agreement if the classifier is random.

When the classification results obtained with the SVM classification method are analyzed, it is seen that the forest class is the most dominant class in the field with an area of 39.36% and 40.36% in both 2016 and 2021, respectively (Table 3 and Figure 4). In 2016, the area allocated to coal mining accounted for 13.06% of the total area, while in 2021, this figure increased by 18% over the five-year period, covering approximately 14.5% of the study area. The distribution of other land use classes, including wasteland, surface water, agricultural land and settlements, is presented in Table 3.

Visual interpretation of the classification results revealed higher classification accuracy with the SVM method compared to the MLC method. The inconsistency in classification success can be attributed to various factors such as image quality, image resolution, classification errors, software errors and handling errors. In order to check the accuracy of the maps created after the classification methods, the maps classified with the MLC and SVM methods created for the years 2016 and 2021 were subjected to accuracy analysis. In order to evaluate the accuracy of these classified maps in ArcGIS Pro, after the classification using all classifiers, overall accuracy (OA), user accuracy (UA) (also referred to as recall), producer accuracy (PA) (precision), and the *k* coefficient were calculated (Table 4, 5). Although the water class offers variable accuracy percentages in terms of UA and PA for the SVM and MLC classifiers of the methods applied here, respectively, it offers the lowest values together with the developed class, while the forest class generally has the highest accuracy values. The situation experienced in water and forest land may probably be due to the lack of a clear spectral signal that expresses the developed class, which represents the construction areas, and therefore it seems to mix with the mining area slope areas in places. Wetlands, on the other hand, gave low values in accuracy due to the reflections they make and the areas similar to the slopes of the mountains in places. In addition, the *k* coefficient used in the cluster analysis was also calculated. The *k* coefficient is used to measure the ratio between the actual and predicted stochastic agreement if the classifier is random.

The *k* coefficient is categorized as shown. The meanings of the kappa values ranging from -1 to 1 are given in (Table 6) [85]. According to the results obtained, the SVM classifier surpassed the MLC by providing higher classification accuracy for each class. The kappa value for MLC was determined as 0.73 in 2016 and 0.72 in 2021, and for SVM, it was determined as 0.87 in 2016 and 0.84 in 2021.

Table 4. Accuracy assessment using confusion matrix generated from test training samples for Planet Scope Dove Classic images based on MLC and SVM techniques

	2016				2021			
	MLC		SVM		MLC		SVM	
Class Name	User's Accuracy %	Producer's Accuracy %	User's Accuracy %	Producer's Accuracy %	User's Accuracy %	Producer's Accuracy %	User's Accuracy %	Producer's Accuracy %
Mining Site	80	60	100	82.25	59.09	86.66	85.71	85.71
Water	60	100	100	100	80	100	40	100
Developed	50	71.43	60	100	44.44	57.14	60	85.72
Barren	63.75	66.66	100	78.12	76.19	61.53	100	89.47
Forest	97.14	94.44	100	100	100	92.1	97.5	90.7
Planted	84	77.77	52.94	90	77.59	77.59	95.83	85.19

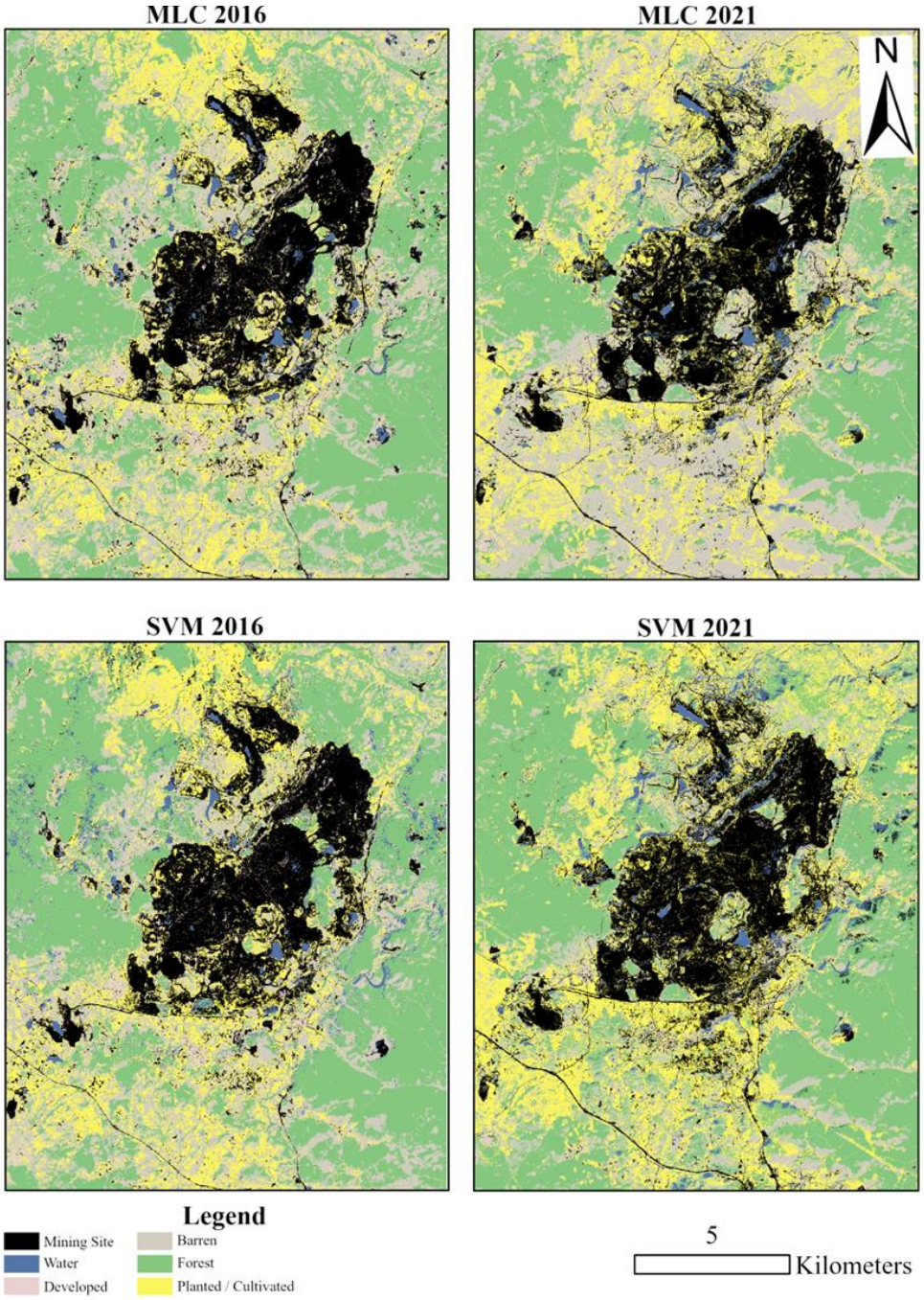


Figure 4. Land cover change map of the study area from 2016 to 2021

Table 5. Overall Accuracy and Kappa Statistics for 2016 and 2021 Classifications

Year	MLC		SVM	
	Overall Accuracy %	*k* Coefficient	Overall Accuracy %	*k* Coefficent
2016	79	0.73	89	0.84
2021	78	0.72	87	0.87

It is seen that there is a difference of approximately 10% between the two methods. It is seen that SVM is in the "very good" range because it remains between 0.81 and 1, while for MLC, although the values are low, they remain between the "good" range of 0.61 and 0.80. In this study, SVM not only outperformed MLC in classifying all linearly separable classes but also achieved superior results when training classes with different spectral reflectance(s).

As a result of the accuracy assessment, images classified by SVM reported higher accuracy for both 2006 and 2016, so images classified by SVM were used to detect changes after classification over the years. According to the results obtained, there was an increase in the mining site, forest and agricultural land classes and a decrease in the water, residential areas and barren land class in 2021 compared to 2016. While the most significant decrease among land

classes was experienced in barren land, the greatest increase occurred in agricultural lands (Table 7).

Table 6. *k* Coefficient Values and Interpretation

Interpretation	Value Range
Very Good	0.81 - 1.00
Good	0.61 - 0.80
Moderate	0.41 - 0.60
Fair	0.21 - 0.40
Poor	-1.00 - 0.20

Table 7. Land cover changes Tunçbilek mining site and its vicinity (hectare(ha))

	2016		2021		2021-2016
Class Name	hectar (ha)	%	hectar (ha)	%	Change (%)
Mining Site	4309.27	13.06	4973.38	14.45	1.39
Water	796.39	2.41	818.03	2.38	-0.04
Developed	816.83	2.48	412.91	1.20	-1.28
Barren	8310.90	25.20	5950.32	17.29	-7.90
Forest	12982.24	39.36	13888.59	40.36	1.00
Planted	5767.96	17.49	8366.08	24.31	6.83

These changes may have occurred as a result of the interaction between various anthropogenic and environmental factors. The observed increase in cultivated areas (+6.83%) could be associated with local land conversion initiatives or a rising demand for agricultural production in response to socioeconomic pressures. The noticeable decrease in barren land (−7.90%) might be related to land rehabilitation efforts, afforestation activities, or the expansion of agricultural use into previously unused areas. The slight increase in forest cover (+1.00%) could be explained by natural regeneration processes or potential afforestation programs, particularly in less disturbed regions. The reduction in developed areas (−1.28%) may reflect the relocation of settlements or abandonment of minor built-up zones due to the expansion of mining operations. These spatial change patterns reflect a complex interplay between human activities and ecological processes in the Tunçbilek mining region. In future studies, these drivers could be explored in greater detail by integrating socioeconomic data and field-based observations.

4. Conclusion and Suggestions

In our study, the land use/land cover (LULC) changes that occurred within a short period (five years) over a relatively small area (approximately 35 hectares) in the Tavşanlı district of Kütahya, western Türkiye a region known for intensive mining activity were investigated using remote sensing methods. Unlike many comparable studies in the literature that rely on freely available medium-resolution satellite data (e.g., Landsat, Sentinel), this study employed high-resolution PlanetScope imagery (3 m), which enhanced image sharpness, facilitated the selection of training points, and contributed to higher classification accuracy.

Similar to the findings of [47, 86-89] our results show that Support Vector Machine (SVM) performs better than Maximum Likelihood Classification (MLC), particularly in cases where land cover classes exhibit overlapping spectral characteristics. Confusion matrix-based accuracy assessment revealed that SVM yielded higher overall accuracy and outperformed MLC in classifying individual categories such as forest and cultivated land, consistent with previous comparative studies in heterogeneous landscapes.

Moreover, this study provides a more localized perspective by applying machine learning techniques to a small-scale mining site. It demonstrates the applicability of these methods in limited geographic extents with reduced computational demands, making them practical for rapid land cover monitoring. While many previous studies have examined land cover dynamics over large regions using medium-resolution imagery, our approach highlights the potential for detailed temporal analysis using very high-resolution satellite data (3 m), which is particularly suitable for monitoring land cover change in small-scale surface mining areas.

According to our findings, a ~1.5% expansion in mining land was observed, while the dominant land cover class (forest) remained stable, indicating limited encroachment into ecologically sensitive zones. These findings can inform local-scale reclamation planning, and the methodological framework can be extended to other sites with similar characteristics.

In conclusion, this study complements and extends previous research by showcasing how the integration of high-resolution satellite imagery with advanced classification methods like SVM offers a reliable, repeatable, and scalable approach for monitoring land use dynamics, particularly in regions undergoing rapid landscape transformation due to mining. Future research could further enhance this methodology by integrating different data sources (e.g., multi-temporal images, radar, or hyperspectral data) and exploring alternative machine learning algorithms to achieve a more comprehensive understanding of land cover changes and improve classification robustness for environmental monitoring in mining areas.

Acknowledgement

The authors would like to express their sincere gratitude to Planet Labs for providing free access to high-resolution PlanetScope satellite imagery, which was instrumental for the analysis conducted in this study. Their support in facilitating open access to Earth observation data is highly appreciated and significantly contributes to the advancement of environmental monitoring and academic research.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Similarity ratio (iThenticate): %18

References

[1] K. Barış and S. Küçükali, Availibility of renewable energy sources in Turkey: Current situation, potential, government policies and the EU perspective, Energy

Policy, vol. 42, pp. 377–391, 2012, https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.12.002.
[2] Y. Huang, S. M. F. Raza, I. Hanif, M. Alharthi, Q. Abbas, and S. Zain-ul-Abidin, The role of forest resources, mineral resources, and oil extraction in economic progress of developing Asian economies, Resources Policy, vol. 69, p. 101878, 2020, https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101878.
[3] A. E. Patiño Douce, Metallic Mineral Resources in the Twenty-First Century. I. Historical Extraction Trends and Expected Demand, Natural Resources Research, vol. 25, no. 1, pp. 71–90, 2016, https://doi.org/10.1007/s11053-015-9266-z.
[4] M. M. Poulton, S. C. Jagers, S. Linde, D. Van Zyl, L. J. Danielson, and S. Matti, State of the World's Nonfuel Mineral Resources: Supply, Demand, and Socio-Institutional Fundamentals, Annu Rev Environ Resour, vol. 38, no. 1, pp. 345–371, 2013, https://doi.org/10.1146/annurev-environ-022310-094734.
[5] O. Vidal, H. Le Boulzec, B. Andrieu, and F. Verzier, Modelling the Demand and Access of Mineral Resources in a Changing World, Sustainability, vol. 14, no.1, p.11, 2021, https://doi.org/10.3390/su14010011.
[6] K. Barış, The role of coal in energy policy and sustainable development of Turkey: Is it compatible to the EU energy policy?, Energy Policy, vol. 39, no. 3, pp. 1754–1763, Mar. 2011, https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.01.007.
[7] Y. Kasap, C. Şensöğüt, and Ö. Ören, Efficiency change of coal used for energy production in Turkey, Resources Policy, vol. 65, p. 101577, 2020, https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101577.
[8] Y. Kasap and F. Duman, Use Efficiency of Primary Energy Resources in Turkey, Energy Exploration & Exploitation, vol. 31, no. 6, pp. 937–952, 2013, https://doi.org/10.1260/0144-5987.31.6.937.
[9] M. S. Delibalta, Türkiye madencilik sektöründe döngüsel ekonomi ve dijitalleşme uygulamaları, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2022, https://doi.org/10.28948/ngumuh.1141644.
[10] M. S. DELİBALTA, Türkiye kömür rezervlerinin rasyonel değerlendirilmesi ve ekonomik önemi, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2024, https://doi.org/10.28948/ngumuh.1391184.
[11] Y. Shan, L. Čuček, P. S. Varbanov, J. J. Klemeš, K. Pan, and H. Zhu, Footprints Evaluation of China's Coal Supply Chains, Computer Aided Chemical Engineering, vol. 33, pp. 1879–1884, Jan. 2014, https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63455-9.50148-3.
[12] R. D. Singh, Principles and Practices of Modern Coal Mining. New Age Publishing, 2005.
[13] J. (Jim) Zhang and K. R. Smith, Household Air Pollution from Coal and Biomass Fuels in China: Measurements, Health Impacts, and Interventions, Environ Health Perspect, vol. 115, no. 6, pp. 848–855, 2007, https://doi.org/10.1289/ehp.9479.
[14] J. Chang-sheng, C. Zhao-xue, and C. Qing-hua, Surface coal mining practice in China, Procedia Earth and Planetary Science, vol. 1, no. 1, pp. 76–80, 2009, https://doi.org/10.1016/j.proeps.2009.09.014.
[15] D. B. Gesch, Analysis of Multi-Temporal Geospatial Data Sets to Assess the Landscape Effects of Surface Mining, Journal American Society of Mining and Reclamation, vol. 2005, no. 1, pp. 415–432, 2005, https://doi.org/10.21000/JASMR05010415.
[16] Z. Li, Z. Ma, T. J. van der Kuijp, Z. Yuan, and L. Huang, A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment, Science of The Total Environment, vol. 468–469, pp. 843–853, 2014, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.090.
[17] D. Ruppen, J. Runnalls, R. M. Tshimanga, B. Wehrli, and D. Odermatt, Optical remote sensing of large-scale water pollution in Angola and DR Congo caused by the Catoca mine tailings spill, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 118, p. 103237, 2023, https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103237.
[18] V. Schueler, T. Kuemmerle, and H. Schröder, Impacts of Surface Gold Mining on Land Use Systems in Western Ghana, Ambio, vol. 40, no. 5, pp. 528–539, 2011, https://doi.org/10.1007/s13280-011-0141-9.
[19] R. N. Sousa and M. M. Veiga, Using Performance Indicators to Evaluate an Environmental Education Program in Artisanal Gold Mining Communities in the Brazilian Amazon, AMBIO: A Journal of the Human Environment, vol. 38, no. 1, pp. 40–46, 2009, https://doi.org/10.1579/0044-7447-38.1.40.
[20] P. A. Townsend, D. P. Helmers, C. C. Kingdon, B. E. McNeil, K. M. de Beurs, and K. N. Eshleman, Changes in the extent of surface mining and reclamation in the Central Appalachians detected using a 1976–2006 Landsat time series, Remote Sens Environ, vol. 113, no. 1, pp. 62–72, 2009, https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.08.012.
[21] M. Hendrychová and M. Kabrna, An analysis of 200-year-long changes in a landscape affected by large-scale surface coal mining: History, present and future, Applied Geography, vol. 74, pp. 151–159, 2016, https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.07.009.
[22] N. Demirel, M. K. Emil, and H. S. Duzgun, Surface coal mine area monitoring using multi-temporal high-resolution satellite imagery, Int J Coal Geol, vol. 86, no. 1, pp. 3–11, 2011, https://doi.org/10.1016/j.coal.2010.11.010.
[23] W. Pei et al., Mapping and detection of land use change in a coal mining area using object-based image analysis, Environ Earth Sci, vol. 76, no. 3, 2017, https://doi.org/10.1007/s12665-017-6444-9.
[24] S. K. Karan and S. R. Samadder, Accuracy of land use change detection using support vector machine and maximum likelihood techniques for open-cast coal

mining areas, Environ Monit Assess, vol. 188, no. 8, 2016, https://doi.org/10.1007/s10661-016-5494-x.
[25] S. Y. Çiçekli, Comparison of object based and pixel based classification methods in land use and land cover determination studies: The case of Yedigoze Reservoir Area, Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci, vol. 13, no. 4, pp. 1372–1381, 2024, https://doi.org/10.28948/ngmuh.1472869.
[26] M. Allam, N. Bakr, and W. Elbably, Multi-temporal assessment of land use/land cover change in arid region based on landsat satellite imagery: Case study in Fayoum Region, Egypt, Remote Sens Appl, vol. 14, pp. 8–19, 2019, https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.02.002.
[27] R. Mahmoud, M. Hassanin, H. Al Feel, and R. M. Badry, Machine Learning-Based Land Use and Land Cover Mapping Using Multi-Spectral Satellite Imagery: A Case Study in Egypt, Sustainability (Switzerland), vol. 15, no. 12, 2023, https://doi.org/10.3390/su15129467.
[28] C. M. Viana, S. Oliveira, S. C. Oliveira, and J. Rocha, Land Use/Land Cover Change Detection and Urban Sprawl Analysis, in Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences, Elsevier, 2019, pp. 621–651. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815226-3.00029-6.
[29] C. Marais Sicre, R. Fieuzal, and F. Baup, Contribution of multispectral (optical and radar) satellite images to the classification of agricultural surfaces, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 84, p. 101972, 2020, https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101972.
[30] C. Zhang et al., Improved Remote Sensing Image Classification Based on Multi-Scale Feature Fusion, Remote Sens (Basel), vol. 12, no. 2, p. 213, 2020, https://doi.org/10.3390/rs12020213.
[31] E. K. Antwi, R. Krawczynski, and G. Wiegleb, Detecting the effect of disturbance on habitat diversity and land cover change in a post-mining area using GIS, Landsc Urban Plan, vol. 87, no. 1, pp. 22–32, 2008, https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.03.009.
[32] J. Belmaker et al., Empirical evidence for the scale dependence of biotic interactions, Global Ecology and Biogeography, vol. 24, no. 7, pp. 750–761, Jul. 2015, https://doi.org/10.1111/geb.12311.
[33] R. Latifovic, K. Fytas, J. Chen, and J. Paraszczak, Assessing land cover change resulting from large surface mining development, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 7, no. 1, pp. 29–48, May 2005, https://doi.org/10.1016/j.jag.2004.11.003.
[34] R. V. O'Neill et al., Monitoring Environmental Quality at the Landscape Scale, Bioscience, vol. 47, no. 8, pp. 513–519, 1997, https://doi.org/10.2307/1313119.
[35] G. P. Petropoulos, P. Partsinevelos, and Z. Mitraka, Change detection of surface mining activity and reclamation based on a machine learning approach of multi-temporal Landsat TM imagery, Geocarto Int, vol. 28, no. 4, pp. 323–342, 2013, https://doi.org/10.1080/10106049.2012.706648.
[36] C. Zhang, P. A. Harrison, X. Pan, H. Li, I. Sargent, and P. M. Atkinson, Scale Sequence Joint Deep Learning (SS-JDL) for land use and land cover classification, Remote Sens Environ, vol. 237, p. 111593, 2020, https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111593.
[37] L. Yu et al., Monitoring surface mining belts using multiple remote sensing datasets: A global perspective, Ore Geol Rev, vol. 101, pp. 675–687, Oct. 2018, https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.08.019.
[38] H. Shih, D. A. Stow, and Y. H. Tsai, Guidance on and comparison of machine learning classifiers for Landsat-based land cover and land use mapping, Int J Remote Sens, vol. 40, no. 4, pp. 1248–1274, 2019, https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1524179.
[39] M. G. Gumus and S. S. Durduran, The performance analyses of support vector machine classifiers for examination of the temporal change of land-use/cover in the Beyşehir Basin in Turkey (1984-2018), Journal of Geodesy and Geoinformation, vol. 8, no. 1, pp. 57–71, May 2021, https://doi.org/10.9733/JGG.2021R0005.E.
[40] C. Huang, L. S. Davis, and J. R. G. Townshend, An assessment of support vector machines for land cover classification, Int J Remote Sens, vol. 23, no. 4, pp. 725–749, 2002, https://doi.org/10.1080/01431160110040323.
[41] A. E. Maxwell, T. A. Warner, and F. Fang, Implementation of machine-learning classification in remote sensing: an applied review, Int J Remote Sens, vol. 39, no. 9, pp. 2784–2817, 2018, https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1433343.
[42] G. Mountrakis, J. Im, and C. Ogole, Support vector machines in remote sensing: A review, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 66, no. 3, pp. 247–259, 2011, https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.11.001.
[43] M. Pal, Random forest classifier for remote sensing classification, Int J Remote Sens, vol. 26, no. 1, pp. 217–222, 2005, https://doi.org/10.1080/01431160412331269698.
[44] M. Pal and P. M. Mather, Support vector machines for classification in remote sensing, Int J Remote Sens, vol. 26, no. 5, pp. 1007–1011, 2005, https://doi.org/10.1080/01431160512331314083.
[45] A. M. Abdi, Land cover and land use classification performance of machine learning algorithms in a boreal landscape using Sentinel-2 data, GIsci Remote Sens, vol. 57, no. 1, pp. 1–20, 2020, https://doi.org/10.1080/15481603.2019.1650447.
[46] B. Ghimire, J. Rogan, V. Galiano, P. Panday, and N. Neeti, An evaluation of bagging, boosting, and random forests for land-cover classification in Cape Cod, Massachusetts, USA, GIsci Remote Sens, vol. 49, no. 5, pp. 623–643, 2012, https://doi.org/10.2747/1548-1603.49.5.623.

[47] C. Huang, L. S. Davis, and J. R. G. Townshend, An assessment of support vector machines for land cover classification, Int J Remote Sens, vol. 23, no. 4, pp. 725–749, 2002, https://doi.org/10.1080/01431160110040323.
[48] D. D. Gbedzi et al., Impact of mining on land use land cover change and water quality in the Asutifi North District of Ghana, West Africa, Environmental Challenges, vol. 6, p. 100441, 2022, https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100441.
[49] M. Siljander, Land use/land cover classification for the iron mining site of Kishushe, Kenya: A feasibility study of traditional and machine learning algorithms, 2020.
[50] S. Vlachogianni, A. Servou, K. Karalidis, N. Paraskevis, M. Menegaki, and C. Roumpos, Remote sensing-based monitoring of land use and cover dynamics in surface lignite mining regions: a supervised classification approach, Earth Sci Inform, vol. 18, no. 2, p. 256, 2025, https://doi.org/10.1007/s12145-025-01781-5.
[51] I. Vorovencii, Long-term land cover changes assessment in the Jiului Valley mining basin in Romania, Front Environ Sci, vol. 12, 2024, https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1320009.
[52] M. Zhang, W. Zhou, and Y. Li, The analysis of object-based change detection in mining area: A case study with Pingshuo coal mine, in International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2017. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W7-1017-2017.
[53] M. Zhang, J. Wang, and Y. Feng, Temporal and spatial change of land use in a large-scale opencast coal mine area: A complex network approach, Land use policy, vol. 86, pp. 375–386, 2019, https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.05.020.
[54] Garp Lignite Operations Directorate, Faaliyetler. https://gli.tki.gov.tr/faaliyetler, Accessed 13 May 2025.
[55] Planet Imagery Product Specifications, Planet Imagery Product Specifications. https://assets.planet.com/docs/combined-imagery-product-spec-april-2019.pdf Accessed 08 March 2025.
[56] B. E. Lefulebe, A. Van der Walt, and S. Xulu, Fine-Scale Classification of Urban Land Use and Land Cover with PlanetScope Imagery and Machine Learning Strategies in the City of Cape Town, South Africa, Sustainability, vol. 14, no. 15, p. 9139, Jul. 2022, https://doi.org/10.3390/su14159139.
[57] M. Xu, P. Watanachaturaporn, P. Varshney, and M. Arora, Decision tree regression for soft classification of remote sensing data, Remote Sens Environ, vol. 97, no. 3, pp. 322–336, 2005, https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.05.008.
[58] K. S. Rawat, S. Kumar, and N. Garg, Statistical comparison of simple and machine learning based land use and land cover classification algorithms: A case study, Journal of Water Management Modeling, 2024, https://doi.org/10.14796/JWMM.H524.
[59] P. K. Srivastava, D. Han, M. A. Rico-Ramirez, M. Bray, and T. Islam, Selection of classification techniques for land use/land cover change investigation, Advances in Space Research, vol. 50, no. 9, pp. 1250–1265, 2012, https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.06.032.
[60] M. Ustuner, F. B. Sanli, and B. Dixon, Application of Support Vector Machines for Landuse Classification Using High-Resolution RapidEye Images: A Sensitivity Analysis, Eur J Remote Sens, vol. 48, no. 1, pp. 403–422, 2015, https://doi.org/10.5721/EuJRS20154823.
[61] D. Gülçin, Arazi Kullanımlarının Sınıflandırılmasında Piksel ve Obje Tabanlı Sınıflandırmanın Karşılaştırılması, Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, vol. 15, no. 2, pp. 43–49, 2018, https://doi.org/10.25308/aduziraat.423782.
[62] J. D. DeWitt, P. G. Chirico, S. E. Bergstresser, and T. A. Warner, Multi-scale 46-year remote sensing change detection of diamond mining and land cover in a conflict and post-conflict setting, Remote Sens Appl, vol. 8, pp. 126–139, 2017, https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.08.002.
[63] O. HAGNER and H. REESE, A method for calibrated maximum likelihood classification of forest types, Remote Sens Environ, vol. 110, no. 4, pp. 438–444, 2007, https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.08.017.
[64] J. A. Richards, Clustering and Unsupervised Classification, in Remote Sensing Digital Image Analysis, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 319–341., 2013, https://doi.org/10.1007/978-3-642-30062-2_9.
[65] S. Y. Çiçekli, Arazi Kullanımı ve Arazi Örtüsü Belirleme Çalışmalarında Sınıflandırma Yöntemlerinin Karşılaştırılması: Yedigöze Baraj Gölü ve Çevresi Örneği, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2024, https://doi.org/10.28948/ngumuh.1472869.
[66] B. F. Noble, Environmental Impact Assessment, in Encyclopedia of Life Sciences, Wiley, 2011. https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0003253.pub2.
[67] D. A. Pisner and D. M. Schnyer, Support vector machine, in Machine Learning, Elsevier, pp. 101–121, 2020. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815739-8.00006-7.
[68] V. N. Vapnik and A. Y. Chervonenkis, On the Uniform Convergence of the Frequencies of Occurrence of Events to Their Probabilities, in Empirical Inference, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 7–12,2013,. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41136-6_2.
[69] H. Tamirat, M. Argaw, and M. Tekalign, Support vector machine-based spatiotemporal land use land cover change analysis in a complex urban and rural

landscape of Akaki river catchment, a Suburb of Addis Ababa, Ethiopia, Heliyon, vol. 9, no. 11, 2023, https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22510.

[70] G. Mountrakis, J. Im, and C. Ogole, Support vector machines in remote sensing: A review, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 66, no. 3, pp. 247–259, 2011, https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.11.001.

[71] S. Martins, N. Bernardo, I. Ogashawara, and E. Alcantara, Support Vector Machine algorithm optimal parameterization for change detection mapping in Funil Hydroelectric Reservoir (Rio de Janeiro State, Brazil), Model Earth Syst Environ, vol. 2, no. 3, p. 138, 2016, https://doi.org/10.1007/s40808-016-0190-y.

[72] C. Avcı, M. Budak, N. Yağmur, And F. Balçık, Comparison between random forest and support vector machine algorithms for LULC classification, International Journal of Engineering and Geosciences, vol. 8, no. 1, pp. 1–10, 2023, https://doi.org/10.26833/ijeg.987605.

[73] S. R. Borra, S. A. V, Z. Alsalami, Y. Chanti, and G. Ramesh, Support Vector Machine with Linear and Radial Bias Function to Classify the Soil Erosion and Land Degradation, in 2024 International Conference on Distributed Systems, Computer Networks and Cybersecurity (ICDSCNC), IEEE, Sep. pp. 1–5, 2024,. https://doi.org/10.1109/ICDSCNC62492.2024.10940051.

[74] T. Kavzoğlu and I. Çölkesen, A kernel functions analysis for support vector machines for land cover classification, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 11, no. 5, pp. 352–359,2009, https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.06.002.

[75] C. Homer and L. Yang, Completion of the 2011 National Land Cover Database for the Conterminous United States-Representing a Decade of Land Cover Change Information , https://doi.org/10.14358/PERS.81.5.345.

[76] J. Wickham, S. V. Stehman, D. G. Sorenson, L. Gass, and J. A. Dewitz, Thematic accuracy assessment of the NLCD 2019 land cover for the conterminous United States, GIsci Remote Sens, vol. 60, no. 1, 2023, https://doi.org/10.1080/15481603.2023.2181143.

[77] S. Aronoff, Classification Accuracy: A User Approach.

[78] George, Rosenfield, and K. Fitzpatrick-Lins, A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy., Photogramm Eng Remote Sensing, vol. 52, pp. 223–227, 1986.

[79] S. Koukoulas and G. A. Blackburn, Introducing New Indices for Accuracy Evaluation of Classified Images Representing Semi-Natural Woodland Environments., Photogramm Eng Remote Sensing, vol. 67, pp. 499–510, 2001.

[80] F. Canters, Evaluating the Uncertainty of Area Estimates Derived from Fuuy Land-Cover Classification.

[81] R. G. Congalton and K. Green, Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data. CRC Press, 2019. https://doi.org/10.1201/9780429052729.

[82] S. Jalayer, A. Sharifi, D. Abbasi-Moghadam, A. Tariq, and S. Qin, Modeling and Predicting Land Use Land Cover Spatiotemporal Changes: A Case Study in Chalus Watershed, Iran, IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens, vol. 15, pp. 5496–5513, 2022, https://doi.org/10.1109/JSTARS.2022.3189528.

[83] J. Wright, T. M. Lillesand, and R. W. Kiefer, Remote Sensing and Image Interpretation, Geogr J, vol. 146, no. 3, p. 448, 1980, https://doi.org/10.2307/634969.

[84] A. SINGH, Review Article Digital change detection techniques using remotely-sensed data, Int J Remote Sens, vol. 10, no. 6, pp. 989–1003, 1989, https://doi.org/10.1080/01431168908903939.

[85] K. M. Brown, Per-pixel uncertainity in change detection using airborne remote sensing, Doctoral Thesis, University of Southampton, Southampton, 2005.

[86] I. Vorovencii, Long-term land cover changes assessment in the Jiului Valley mining basin in Romania, Front Environ Sci, vol. 12, 2024, https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1320009.

[87] A. A. Omeer, R. R. Deshmukh, R. S. Gupta, and J. N. Kayte, Land Use and Cover Mapping Using SVM and MLC Classifiers: A Case Study of Aurangabad City, Maharashtra, India, pp. 482–492, 2019. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9187-3_43.

[88] I. Vorovencii, Comparing the Performance of Different Classification Algorithms for Mapping and Assessing Land Cover Changes in Areas with Surface Mining and Complex Landscape Using Landsat Imagery, 2023. https://doi.org/10.20944/preprints202305.1345.v1.

[89] B. R. Deilmai, B. Bin Ahmad, and H. Zabihi, Comparison of two Classification methods (MLC and SVM) to extract land use and land cover in Johor Malaysia, IOP Conf Ser Earth Environ Sci, vol. 20, p. 012052, 2014, https://doi.org/10.1088/1755-1315/20/1/012052.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci. 2025; 14(3), 1014-1025
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
Araştırma makalesi / Research article
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Velocity dynamics in Türkiye's nationwide cadastral network

Türkiye geneli kadastral ağlarda hız dinamiklerinin incelenmesi

Sena Özlem Yeniay[1], Halil İbrahim Solak[2], Cemil Gezgin[3], İbrahim Tiryakioğlu[4,*]

[1,4] *Department of Geomatics Engineering, Engineering Faculty, Afyon Kocatepe University, Afyonkarahisar, Türkiye*
[2,4] *Earthquake Implementation and Research Center of Afyon Kocatepe University, Afyonkarahisar 03200, Türkiye*
[2] *Distance Education Vocational School, Afyon Kocatepe University, Afyonkarahisar 03200, Türkiye*
[3] *Department of Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, Aksaray University, Aksaray 68100, Türkiye*

Abstract

Turkey, situated within a tectonically active region, is subject to frequent seismic events that induce crustal deformation of varying magnitudes. These deformations differentially affect geodetic infrastructure across distinct zones, leading to measurable variations in the velocity fields of geodetic benchmarks. This study investigates continuous velocity changes observed at geodetic sites across Turkey, resulting from cumulative deformation between the establishment of the geodetic network and the present day. Velocity components (Vx, Vy, Vz) for C1 and C2 benchmarks were obtained from the Map Data Bank (HBB) and compared with contemporary velocities predicted using the Turkish National Reference Frame (TUREF) published by the General Directorate of Mapping (HGM). Cartesian velocities of 482 C1 and C2 sites distributed across Turkey were analyzed, and component-based velocity difference maps were generated. Maximum velocity discrepancies were determined as 25 mm/year (X-component), 39 mm/year (Y-component), and 37 mm/year (Z-component). These inconsistencies highlight the potential for decimeter-level errors in the coordinates during long-term epoch transformations, which may propagate into cadastral infrastructure distortions.

Keywords: Velocity accuracy, Interpolation, GNSS velocity, Epoch translation, C1-C2 sites

Öz

Tektonik olarak aktif bir bölgede yer alan Türkiye, çok sayıda depreme maruz kalmakta ve bunun sonucunda farklı büyüklüklerde deformasyona uğramaktadır. Bu deformasyonlar jeodezik altyapıyı farklı bölgelerde ve farklı büyüklüklerde etkileyerek jeodezik noktaların hızlarında değişimlere neden olmaktadır. Bu çalışma kapsamında jeodezik altyapının kurulduğu süreçle günümüz arasında meydana gelen birikmiş deformasyonlar sonucunda Türkiye genelinde jeodezik noktalarda meydana gelen hız değişimleri incelenmiştir. Bu amaçla Harita Bilgi Bankası'ndan C1 ve C2 noktalarına ait Vx, Vy ve Vz hızları temin edilmiş ve bu noktaların Harita Genel Müdürlüğü (HGM) tarafından yayınlanan Ulusal Jeodezik Hız Alanı (TUREF) kullanılarak kestirilen güncel hızları arasındaki farklar incelenmiştir. Türkiye geneline dağılmış 482 adet C1 ve C2 noktasına ait kartezyen hız verileri incelenerek her bir nokta için bileşen bazında fark haritaları üretilmiştir. X, Y ve Z bileşenleri için hız farkları sırasıyla maksimum 25, 39, 37 mm/yıl olarak elde edilmiştir. Bu farklar uzun dönemde yapılacak epok taşımalarının koordinatlarda desimetre seviyesinde hatalara neden olabileceğini ve kadastral altyapıda bozulmalara neden olabileceğine işaret etmektedir.

Anahtar kelimeler: Hız doğruluğu, Enterpolasyon, GNSS hızı, Epok taşıma, C1-C2 noktaları

1 Introduction

Turkey, due to its unique tectonic setting, lies within one of the most actively deforming segments of the Alpine-Himalayan Orogenic Belt—one of the world's three major seismic zones in terms of seismicity. The neotectonic evolution of Turkey and adjacent regions is closely linked to continental convergence driven by the collision between the African-Arabian and Eurasian plates, as well as subsequent geological processes arising from this interaction [1,2]. The Anatolian Plate, subjected to the northward motion of the Arabian Plate toward the Eurasian Plate, undergoes westward displacement. The movement of Western Anatolia, constituting the western segment of the Anatolian Plate, is characterized by SW-directed motion resulting from the subduction of the African Plate beneath the Eurasian Plate along the Hellenic Arc [3-5] (Figure 1). The Anatolian Plate, situated between the tectonically stable Eurasian Plate to the north and the southward-advancing African and Arabian Plates, hosts numerous active faults resulting from compressional forces and kinematic loading induced by these two southern plates. In addition to these primary active fault structures, secondary fault systems and fault zones divide Anatolia into smaller blocks, contributing to the neotectonic evolution of the Anatolian block. This dynamic process has given the region with a structurally complex and rapidly deforming geological character. The Anatolian Plate, traversed by active fault zones, has historically hosted and continues to host numerous large, destructive earthquakes.

The deformation resulting from the collision of the Eurasian and Arabian plates along the Bitlis-Suture Zone led

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: itiryakioglu@aku.edu.tr (İ Tiryakioğlu)
Geliş / Received: 19.04.2025 Kabul / Accepted: 26.05.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1679965

to the formation of the left-lateral strike-slip East Anatolian Fault Zone (EAFZ) and the right-lateral strike-slip North Anatolian Fault Zone (NAFZ). The ongoing convergence between the Eurasian and Arabian plates following their collision has driven the development of four distinct neotectonic provinces in Turkey: The East Anatolian contractional province, the North Anatolian province, the Central Anatolian "Ova" province, and the Western Anatolian Extensional Province (WAEP) [6-8]. The NAFZ, one of the most significant tectonic elements of the Anatolian Plate and a transform fault system with an E-W orientation and right-lateral strike-slip motion that separates the Eurasian and Anatolian plates, extends from the north of Lake Van in the east. It progresses westward from Karlıova through Erzincan, Suşehri, Reşadiye, Erbaa, Havza, Ladik, Kargı, Ilgaz, Kurşunlu, and north of Çerkeş, continuing through İsmetpaşa, Gerede, Bolu, and Lake Abant, then traverses Lake Sapanca and the Gulf of İzmit, passing beneath the Sea of Marmara, and extends to the southern part of Thrace [9,10]. An examination of historical and instrumental earthquake records reveals that numerous destructive earthquakes with surface ruptures have occurred along the NAFZ, with magnitudes ranging between 6.3 and 7.4 (Mw), including notable events such as the 1992 Erzincan, 1999 Düzce, and 1999 Gölcük earthquakes [11-14]. EAFZ, the second major fault zone of the Anatolian Plate, intersects with the NAFZ near Karlıova in the north and extends from Gölbaşı through Kahramanmaraş and the Amik Plain to the Mediterranean Sea. This fault zone, which exhibits a complex left-lateral strike-slip motion in a NE-SW orientation, has also experienced numerous destructive earthquakes, the most recent being the 2023 Maraş earthquakes (Pazarcık Mw: 7.7 and Ekinözü Mw: 7.6) [15-19]. Following the NAFZ and EAFZ, the WAEP stands out as one of the most significant seismic source regions in the platelet. Deforming at an average rate of approximately 20 mm/year, it is among the fastest deforming continental regions in the world. This region typically releases accumulated energy through numerous low-to-mid magnitude swarm-type seismic activities, yet, similar to other regions of the Anatolian Plate, it has also experienced numerous destructive earthquakes with magnitudes exceeding M:6 (1919-Balıkesir, 1955-Söke, 1970-Kütahya, 1995-Dinar), [12, 20]. Although Central Anatolia is considered a relatively quiet region in seismically active Turkey, it contains faults of varying orientations and characteristics due to the extensional regime from the west and the escape tectonics driven by the compressional forces from the east acting on the Anatolian Plate. The main tectonic structures in the Central Anatolian region include the left-lateral Central Anatolian Fault Zone, the Tuz Gölü Fault Zone with a right-lateral and normal fault component, the İnönü–Eskişehir Fault System, the Konya Block Fault Zone, and the Akşehir Fault Zone [21-24]. Numerous earthquakes with magnitudes exceeding M:5 have occurred in the crust forming the central part of the Anatolian Plate during the instrumental period, the most recent of which is the 2023 Obruk earthquake (Mw: 5.3) (1921-Altınekin, 1938 Kırşehir, 1968-Cihanbeyli, 2007-Bala, 2016-Çiçekdağı, 2020-Obruk) [12, 20].

In addition to the complex and multiple damage they inflict on natural and artificial features through ground shaking, earthquakes—particularly those with M≥6 and shallow focal depths—can generate surface ruptures ranging in length from centimeters to kilometers [25]. A surface rupture, defined as the deformation that can occur on the Earth's surface as a result of a moderate to large earthquake (M ≥ 6) originating from a fault, is directly related to the earthquake's magnitude, focal depth, fault geometry, rupture process and propagation, as well as the intrinsic properties of the units affected by the fault and located near the surface [26]. Furthermore, the displacement (slip) between blocks on either side of a fault zone varies depending on the earthquake's magnitude. These surface ruptures and displacements, which cause significant crustal deformation, have produced substantial horizontal and vertical displacements in events occurred earlier:

- The 1939 Erzincan earthquake (Mw 7.8) generated ~360 km of surface rupture with ~7.5 m of slip
- The 1999 Gölcük earthquake resulted in ~130 km of rupture with ~5 m displacement
- The 2002 Çay earthquake created ~26 km of rupture with up to 30 m vertical displacement [27-29], (Figure 2).

Among the most significant seismic disasters recently experienced in Turkey, the 2023 Kahramanmaraş earthquakes (Mw 7.7 Pazarcık and Mw 7.6 Ekinözü) produced surface ruptures spanning 80-270 km across different segments, with observed displacements exceeding 7 meters [18, 30-34]. The surface ruptures and displacements, which are more prominently observed during large shallow earthquakes, cause significant positional changes in reference points especially near the epicenter where displacements are measured, leading to substantial damage to geodetic infrastructure. Determining the horizontal and vertical displacements caused by seismic events is crucial for maintaining the accuracy of position-based studies post-earthquake. In this context, preserving the currency of geodetic infrastructure against such deformations is of critical importance

As detailed in the preceding section, historical records indicate that Turkey experienced over 200 destructive earthquakes prior to 1900. During the instrumental period, numerous earthquakes exceeding magnitude 7.0—occurring in various regions and at different times—have caused significant casualties, surface ruptures, and consequently major infrastructure damage and economic losses [35]. In seismically active Turkey, earthquakes frequently generate vertical and horizontal crustal movements reaching several meters in magnitude. Such displacements can now be accurately modeled using data obtained from GNSS observations, facilitated by advancements in Satellite Technologies [36-42]. Intraplate tectonic movements and their resultant earthquakes not only cause socio-economic damage but also directly impact the country's geodetic infrastructure by inducing annual centimeter- to meter-scale displacements of surface points [43].

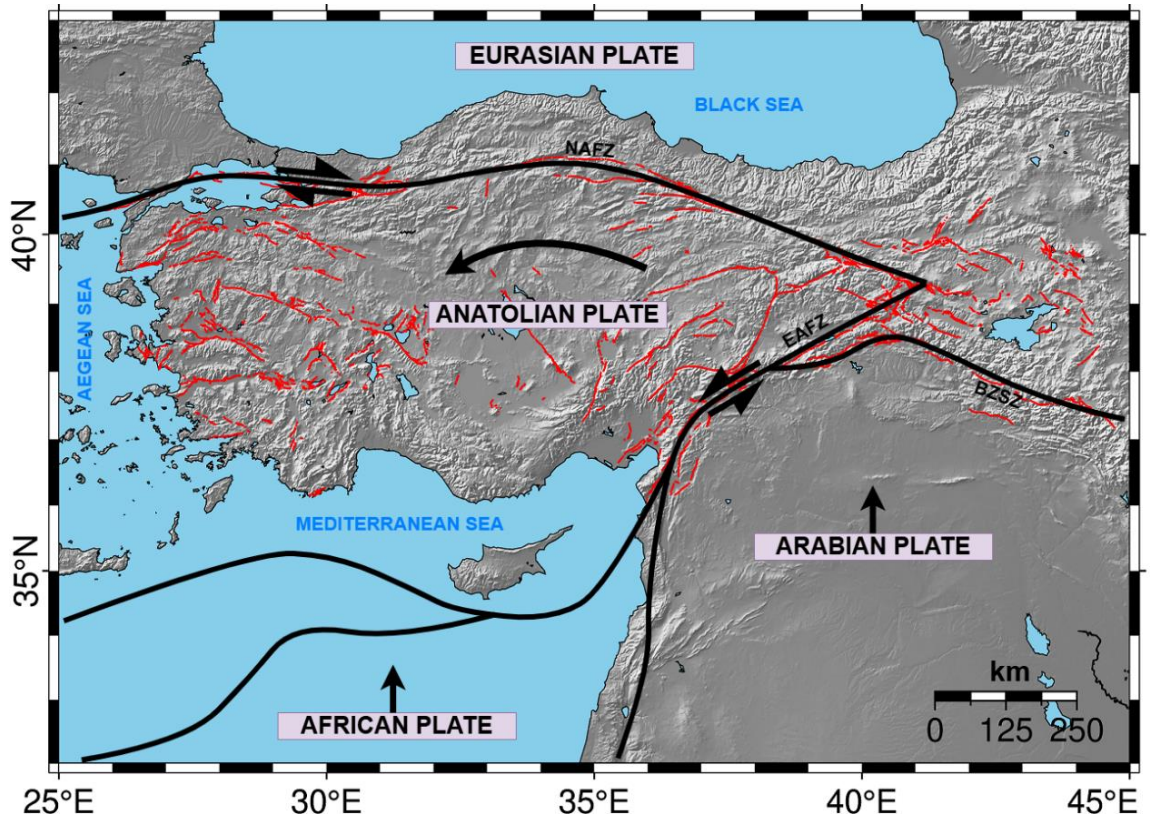


Figure 1. The major tectonic structures within the Anatolian Plate are shown in the Figure (red lines represent faults sourced from Emre et al. [11], while light gray lines denote faults obtained from Zelenin et al. [44], Şafak Yaşar [45] Thick black arrows indicate the motion directions of major plates, whereas thick black lines represent principal plate boundaries (NAFZ: North Anatolian Fault Zone, EAFZ: East Anatolian Fault Zone, BZTS: Bitlis-Zagros Thrust Belt, DSFZ: Dead Sea Fault Zone, HA: Hellenic Arc, CA: Cyprus Arc).

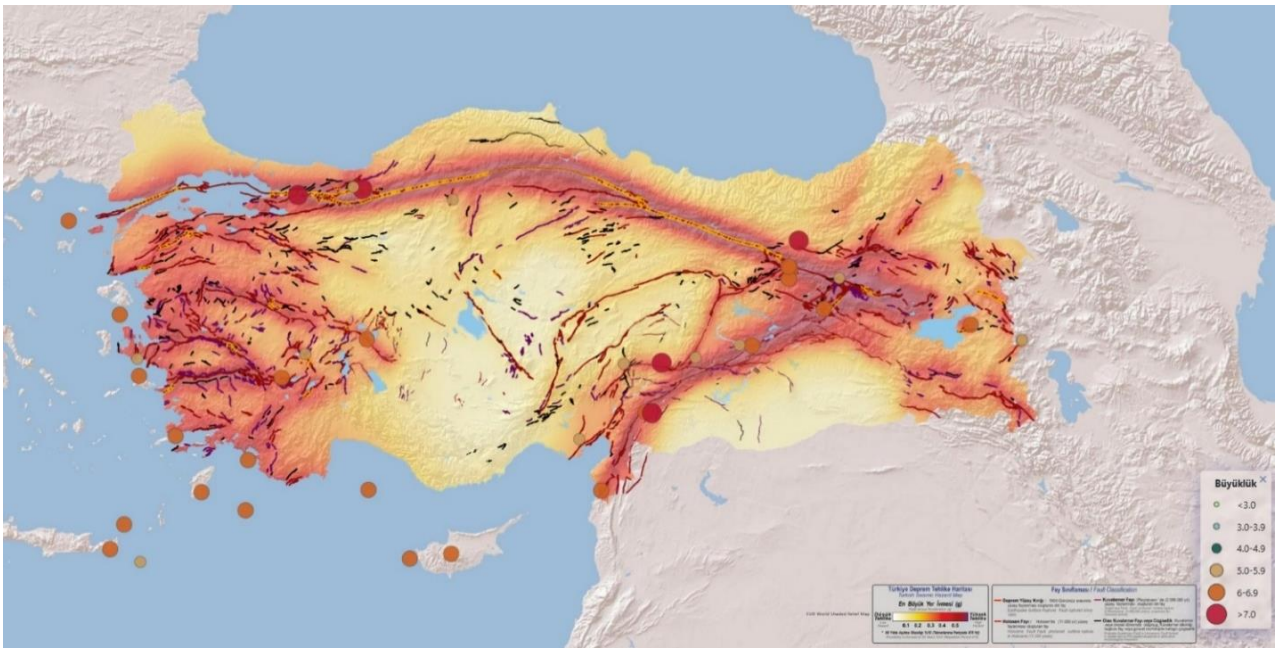


Figure 2. The representation of M≥6 earthquakes that occurred in Turkey and its surrounding region on the Earthquake Hazard Map (AFAD).

Due to the fact that almost the entire country, consisting of seven different geographic regions, is under a high-risk earthquake threat and the impact of major earthquakes that have occurred in these regions in the past, changes in the coordinates and velocities of the points in the Turkish National Fundamental GPS Network (TNFGN-TUTGA) have led to the influence on the velocities of C1 and C2 class points used in cadastral studies in the country. The changes in position and velocity occurring at TNFGN and Turkish National Permanent GPS Network-Active (TNPGN-Active, TUSAGA-Active) points as a result of earthquakes lead to discrepancies in the coordinates and velocities of points in geodetic networks. These changes cause shifts in property boundaries, loss of accuracy in digital maps, and ultimately disrupt the relationship between the land and the map [46-48]. The velocities of the C1 and C2 points in our country have been calculated using the interpolation method, based on velocities obtained in previous years. The velocities used in the interpolation method are calculated by making necessary estimates with the TNFGN and TNPGN-Active data prepared and provided by the General Directorate of Mapping (HGM). The velocities obtained by the HGM have varied over time due to tectonic movements or insufficient measurement data. For these reasons, it is crucial to continuously update the geodetic infrastructure in our country, which is largely seismically active, as it is vital for the accuracy of spatial-based positioning studies.

Similarly, the European Datum 1950 (ED-50) and the Turkey National Horizontal Control Network (TUYKA), which have been in use since the 1950s, have undergone deformation due to tectonic movements and can no longer provide high positioning accuracy due to being a static network. Therefore, with advancements in satellite technology, the Turkey National Fundamental GNSS Network (TNFGN-99; TUTGA-99) was established through studies conducted between 1997 and 1999. However, subsequent earthquakes caused large-scale displacements at TNFGN points, leading to an update of the network, which was redefined as TNFGN-99A. Later, in 2015, new measurements were conducted, and the TNFGN network was completely renewed, now serving as one of the fundamental platforms for positioning applications in its current form [49,50]. Today, the TNFGN and TNPGN-Active networks, which are key components of the country's geodetic infrastructure, play a critical role in monitoring plate and crustal movements by serving as the primary source through real-time data obtained using GNSS technology, which includes time information (X, Y, Z, t). In addition, the velocities of C1 and C2 degree points, which are used in cadastral studies and form the foundation of the geodetic network from past to present, are directly related to the accuracy of the TNFGN and TNPGN-Active velocities, which have changed in parallel with the development of the country's geodetic infrastructure. These velocities are calculated through interpolation. In addition to the impact of earthquakes on the velocities of C1 and C2 degree points from past to present, the differences in the establishment years of these points can also cause significant discrepancies in velocities. This is because the velocities prior to the TNPGN-Active system were calculated based on the surrounding existing TNFGN points, which may lead to notable differences between the velocities. Due to the velocity estimation of TNFGN points based on the existing campaign data at the time of establishment of C1 and C2 points, velocity differences may arise between points located in close proximity to each other. Additionally, uncertainties regarding which points to use for interpolation in the velocity estimation process can also create issues in the calculation of velocities. All of these factors are considered to have a significant impact on the reliability of cadastral studies and the accuracy of geodetic measurements, potentially leading to a series of negative consequences. Therefore, it is crucial to regularly update geodetic networks and cadastral data, as well as to continuously monitor the effects of earthquakes, for ensuring positioning accuracy.

Therefore, the aim of this study is to analyze the differences between the velocities calculated in different periods for cadastral points established at various times in Turkey, which have been subjected to coseismic and postseismic effects from past to present. By examining these velocity changes using TNFGN and TNPGN-Active data, the study seeks to quantitatively reveal potential issues in velocity calculations and the impact of tectonic deformations and time on geodetic networks. In this context, the velocities obtained from interpolations at the time of establishment of selected C1 and C2 points in different regions, uniformly distributed across Turkey, have been compared with the new velocity values calculated from the current velocities of TNFGN and TNPGN-Active points. These velocities were calculated using the interpolation method and then compared. In this calculation process, the TNFGN and TNPGN-Active data provided by the HGM were used. Differences between the velocities estimated for cadastral points, based on the time of their establishment and the increasing number of campaigns, especially for TNFGN points, have been observed in the TNFGN and TNPGN-Active data provided by the HGM. Additionally, time-dependent changes in velocities due to earthquakes have also been observed. The changes caused by earthquakes occurring along active tectonic belts in our country in the coordinates and velocities of the points vary depending on the magnitude of the earthquake. Sometimes, the effects last for 1-2 months, while in other cases, they can persist for as long as 5-15 years [51, 52]. Therefore, during this period, updating the postseismic velocities and coordinates of the points, especially those located in the area where the earthquake occurred, is crucial for reducing the effects of the earthquake and for location and property-based studies related to post-earthquake reconstruction.

2 Material and method

In order to examine the velocity changes that have occurred between past years and the present at C1 and C2 points, which are homogeneously distributed across Turkey, the differences between the Vx, Vy, and Vz velocities obtained at the point level from the HBB and the GNSS point

velocities provided by the HGM have been analyzed. For this purpose, the coordinate information and GNSS velocities of the C1 and C2 points were obtained from the online services of the relevant institutions, and using these data, the TUREF Datum and ITRF-96 velocities of the points for velocity estimation were obtained through interpolation. A total of 482 points were analyzed, and the ITRF-96 velocities (Vx, Vy, Vz) in the TUREF Datum were determined using the latitude and longitude information, and the results were listed in a table. Additionally, to determine the accuracy of the calculated velocities, the points were queried on a 1/25,000 scale map using sheet numbers from the Map Data Bank website. The point numbers, types, latitude and longitude information, velocities calculated using the interpolation method, production and reference years, and other related details for the points within each sheet boundary have been listed and organized into a table. In this application process, with particular attention given to the fact that the reference years of the points are from 2005 onwards, the information obtained from the two velocity fields was used to compare all components of the points' TUREF velocities (Vx, Vy, Vz). Difference maps were created for each component, and the difference values between the obtained velocities were assessed on a regional scale.

2.1 Study area and dataset

This study, aimed at numerically presenting the velocity changes occurring during the development and transformation process of geodetic infrastructure at cadastral points, was conducted on a national scale in Turkey. For this purpose, a total of 1,360 1/25.000 scale sheets across Turkey were examined using the General Directorate of Land Registry and Cadastre (TKGM) and HBB portal. In the portal, which aims to compile and present all types of map-related information from various sources under a single platform, detailed information on geodetic points is provided by the Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change and the General Directorate of Land Registry and Cadastre – Department of Mapping. Based on the data obtained from these sheets, 12,380 potential points were identified across the country that could represent the velocity characteristics of each region. In the data analysis process, it was assumed that there would be no significant differences between the velocities calculated at points that are close to each other. Therefore, only the sheets within the “a” section of the area divided into 1/25,000 scale sheets were considered. Then, considering the need for homogeneous representation of different blocks on the Anatolian Plate, as well as ensuring the data's current and reliable nature, a total of 482 C1-C2 points with a reference year of 2005 and established as pillars were evaluated within the scope of the study (Figure 3).

After obtaining the coordinates, Xsigma, Ysigma, Zsigma values, establishment years, and the campaign measurements (>3) available at the time of establishment for the selected points, the velocities (Vx, Vy, Vz) were calculated using interpolation. The reference epoch information was also acquired, and then the current velocities of the points were calculated. For this purpose, the velocity data for the years 1992-2021 were initially calculated based on the GNSS measurements of the TNFGN and TNPGN-Active points carried out by the HGM. These velocity data have been made available to users on the TUREF Velocity Field platform on the official website of the General Directorate of Mapping as of 2023 [53]. Following the earthquakes that occurred within the TUREF velocity field—where a total of 1,547 stations across Turkey and its surroundings were analyzed, including 723 single-epoch and 824 multi-epoch sites, with velocity components estimated using cross-validation and the Kriging algorithm—a need arose for an update [54]. As part of the TUREF project revision, previous GPS data from the inventory of the HGM were re-evaluated, time series were examined, and inconsistent data were removed [55]. In addition to the points permitted for use in velocity estimation in accordance with the regulations, this dataset also includes geodynamic and tide gauge GPS stations maintained by the HGM, as well as stations operated by various institutions and municipalities, to enhance spatial resolution. Within the project, all stations are classified into five statistically significant regions, and velocity data are provided through 6'x6' resolution grid files. Through this interface, which allows users to input the latitude and longitude coordinates of a specific point to estimate the TUREF Datum and ITRF-96 velocities (Vx, Vy, Vz), queries were conducted based on the latitude and longitude location data of the 482 points previously selected using the HBB online interface. As a result, the most up-to-date TUREF Datum and ITRF-96 velocity (Vx, Vy, Vz) information for these points was obtained, providing the current velocity data for the points.

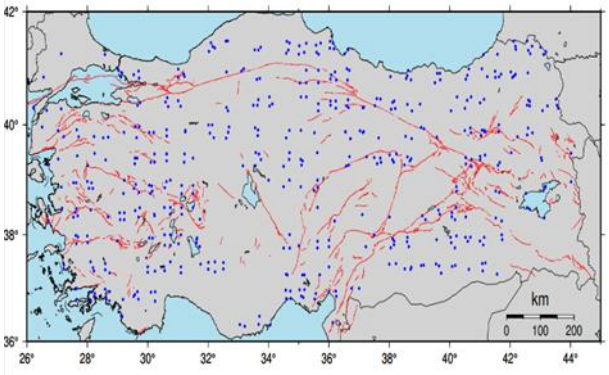


Figure 3. Locations of C1 and C2 degree points used in the study on the map of Turkey

3 Findings and discussion

The velocity data of the 482 points from previous periods filtered within the scope of the study were obtained through the HBB portal, and the current velocities of the relevant points were determined via the HGM velocity estimation portal. The velocities of the points are critical data that demonstrate how the positional changes in three-dimensional space have evolved over time. The velocity components of the points for which both past and current velocities were obtained were calculated in the X, Y, and Z directions, representing the east-west, north-south, and up-down movements of each point. The velocity data obtained

separately from both systems were selected at the ITRF-96, 2005.00 epoch to ensure the consistency and comparability of the data sets. The differences between the velocities calculated from relatively limited data in the past and those calculated using the current network were then calculated on a component basis. The velocity differences in the X, Y, and Z components were evaluated separately, and these differences were visualized and interpreted using various methods. As a result of the calculations and analyses, the regional distribution of the velocity differences was also examined. This distribution also facilitates the comparison of geodetic movements in different geographic regions. Visual representations of the velocity differences in the XY direction, as well as histograms for the velocity differences obtained separately in the X, Y, and Z components, are provided in Figures 4 through Figure 9, respectively, based on the comparison of the past and current velocity data obtained from the HBB and HGM velocity estimation portal.

In Figure 4, which presents the vector sum of the velocity differences in the X and Y components, the maximum values of the horizontal velocity differences are observed in the Eastern and Southeastern Anatolia regions. It is observed that the velocity differences in the region of the Karlıova Triple Junction, a tectonically significant intersection, and the area of the EAFZ exceed 25 mm/year. In contrast, the points around the NAFZ in the Western Anatolia and Black Sea regions show velocity differences of approximately 10 mm/year. When evaluating the velocity differences in the X component shown in Figure 5, it is observed that these differences range from -11 mm/year in the south to 25 mm/year in the north. The largest velocity difference is found in the region of Batman Province. When examining the establishment years of these points, it is observed that they were established in 2006. Generally, when analyzing the velocity differences in the X component, it is seen that the differences are higher in the Southeast region compared to other regions.

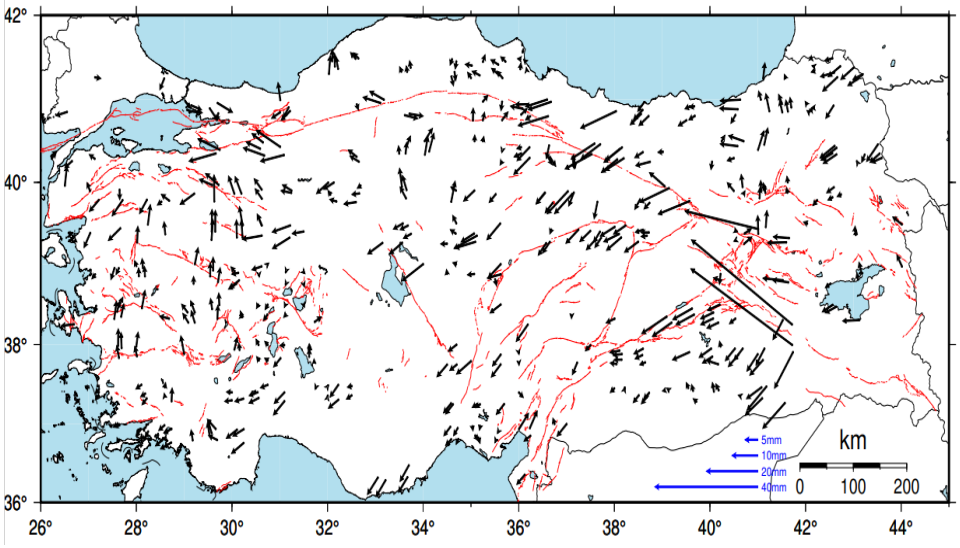


Figure 4. The graph of velocity differences in the XY horizontal component

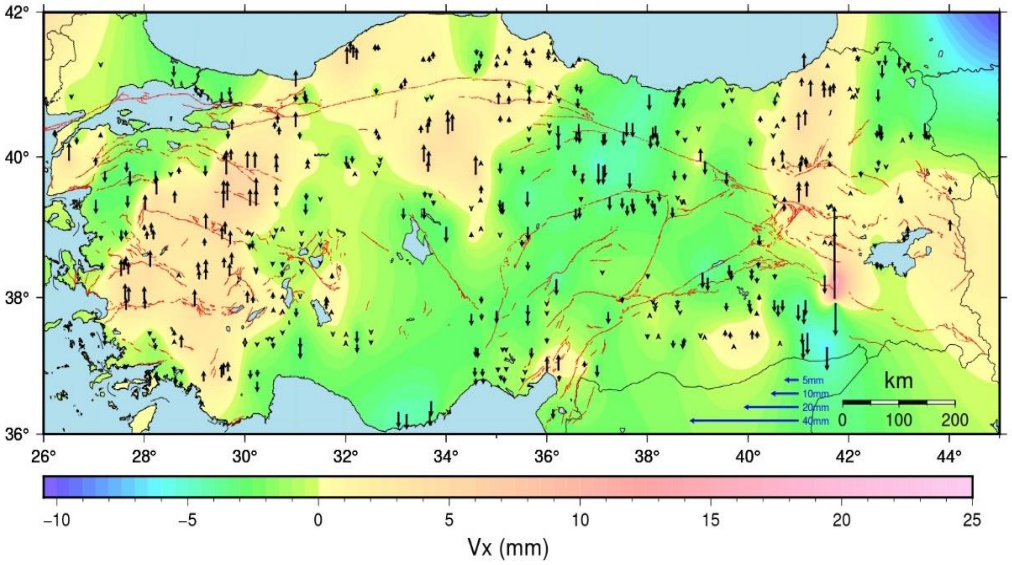


Figure 5. The graph of velocity differences in the X component

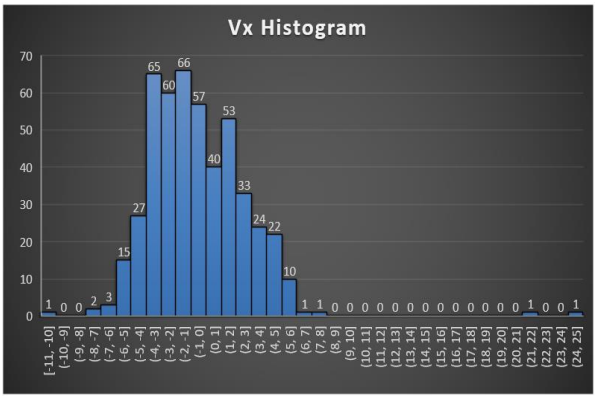


Figure 6. Vx Histogram Chart

In the histogram graph representing the distribution of the velocity differences in the X component of the points, it is observed that the majority of the points are concentrated around ±3 mm/year. When evaluating the velocity difference graph in the Y component provided in Figure 7, it is observed that the results for the Marmara, Black Sea, and Southeastern regions are higher compared to the other regions. It is observed that these velocity differences range from -39 mm/year in the west direction to 6 mm/year in the east direction. The largest velocity differences are found in the Marmara region, within Istanbul, where the establishment year is 2007; in the Black Sea region, within Çorum, with the establishment year being 2007; in the Southeastern region, within Siirt, where the establishment year is 2006; and in the Aegean region, in Muğla, where the establishment year is 2013. These regions exhibit higher differences compared to the other regions.

When evaluating the velocity difference graph in the Z component shown in Figure 8, it is observed that the largest velocity differences in the western region are found within Muğla province. The establishment year of these points is 2007. In the eastern regions, the largest velocity difference is observed in Mardin province, with the establishment year being 2020. When examining the velocity differences in the Z component, it is generally observed that the differences are higher, especially in the eastern and southeastern regions.

The differences between the velocities obtained from the HBB and the HGM have been examined on a component basis. For the X component, the velocity differences for 472 of the 482 points are between ±6 mm/year. Among these points, 216 have velocity differences ranging from ±2 mm/year. The velocity differences for other points in the X component range from ±7 to 25 mm/year. The maximum velocity difference is located within the borders of Siirt province and was established in 2006. When examining geodetic studies in this region, it is observed that the maximum velocity differences calculated by Aktuğ et al. [54] around Siirt are at their highest levels. This observation is similarly continued in the study published by Kurt et al. (2020). Since the C1-C2 velocities in Turkey are iteratively obtained from TNFGN points, it is considered that the TNFGN data calculated by Aktuğ (2011) is used at the point where the maximum velocity difference occurs. However, it is believed that these differences may have occurred due to the limited number of GNSS campaigns conducted at TNFGN points until the reference year of 2006. Similarly, the Kütahya-Bursa region, where the maximum differences for the X component are observed, is also identified as one of the regions with the highest differences in the study by Kurt et al. [55]. For the Y component, the velocity differences for 466 out of 482 points were observed to range from -9 mm/year to +3 mm/year. It was found that for 246 of these points, the differences were within ±2 mm/year. However, for the other points, the velocity differences for the Y component varied significantly between ±5 mm/year and 39 mm/year (Figure 9a).

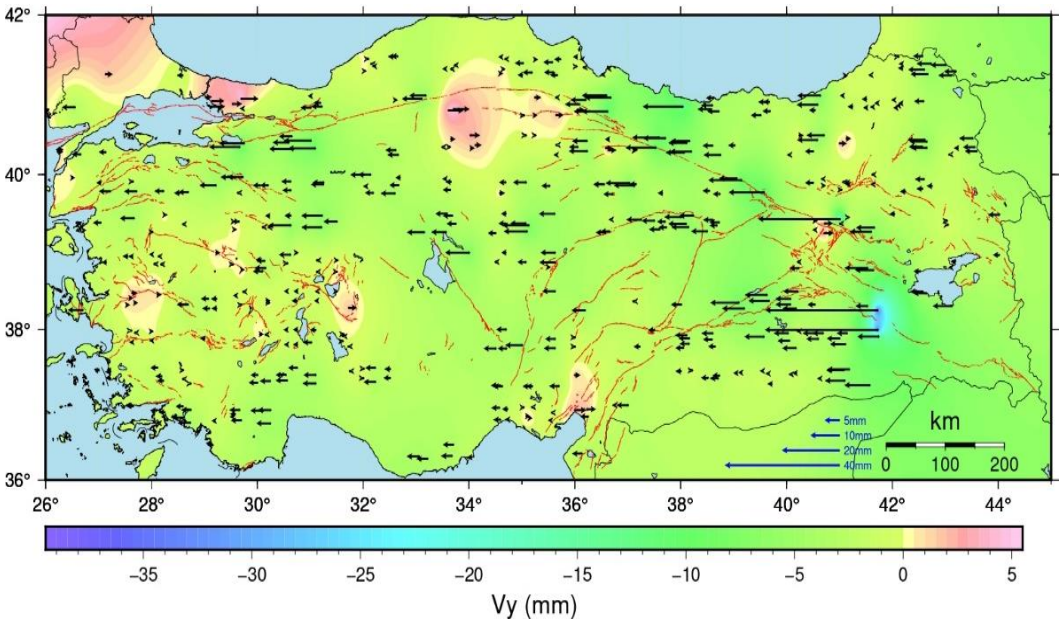


Figure 7. The graph of velocity differences in the Y component

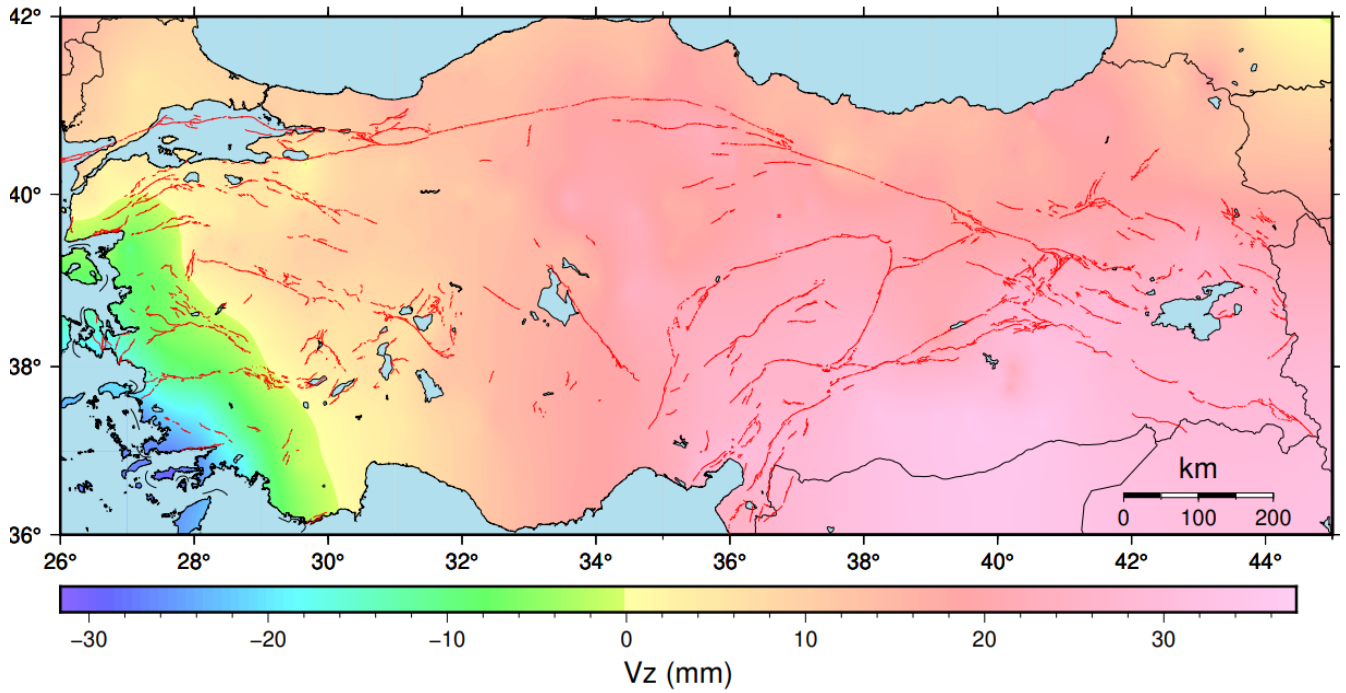
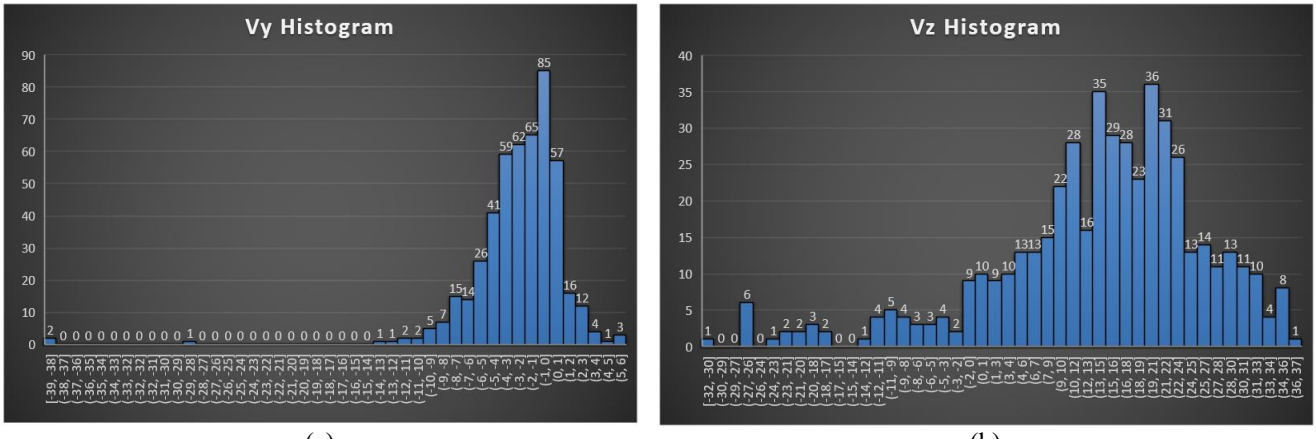


Figure 8. The graph of velocity differences in the Z component

In particular, the maximum velocity difference is located within the boundaries of Siirt province and corresponds to a point established in 2006. The analysis of geodetic studies conducted in this region revealed that the maximum velocity differences reported by Aktuğ et al. [54] have increased notably. These findings were also confirmed in the study conducted by Kurt et al. [55]. For the Z component, the velocity differences for 438 out of 482 points were found to range between -1 mm/year and +35 mm/year. For 245 of these points, the velocity differences were found to range between ±10 mm/year and 23 mm/year. For the remaining points, the differences varied between ±32 mm/year and 37 mm/year. The maximum velocity differences in the Z component were identified in the eastern region around Siirt province and in the western region around Muğla province (Figure 9b). When the obtained findings are compared with a similar study in the literature by Balaban et al. [56], the velocity differences in the X component for Afyonkarahisar and its surroundings were calculated between -5 mm/year and +10 mm/year in this study, whereas in the other study, this region was represented with differences ranging from -15 mm/year to +10 mm/year. For the Y component, the maximum differences were approximately -10 mm/year in both studies, while for the Z component, the values were around +10 mm/year. Based on these findings, it can be stated that the velocity differences obtained for the X, Y, and Z components in points located around Afyonkarahisar are consistent between the two studies, indicating a general agreement in their results.



(a) (b)

Figure 9. (a) Vy histogram chart (b) Vz histogram chart

4 Conclusions

In this study, the component-basis differences in GNSS velocity data, which can vary over time due to tectonic activity or limitations in measurement frequency, were analyzed at geodetic control points of C1 and C2 classes across Turkey—an area affected by active tectonic movements. The data used were obtained from the HBB and HGM. Analyses conducted at 482 points with a homogeneous national distribution revealed maximum velocity differences of up to 25 mm/year in the X component, 39 mm/year in the Y component, and 37 mm/year in the Z component. These discrepancies were found to be particularly pronounced in the Eastern and Southeastern Anatolia regions, where high tectonic deformation is present, while lower differences were observed in the Western Anatolia and Black Sea regions. The main causes of the observed differences are thought to include limited GNSS campaign data during the establishment years of the points, interpolation limitations, and the temporal variability of tectonic motion. The findings highlight the potential for decimeter-level errors in long-term epoch transformations and underscore the necessity of periodically updating the geodetic infrastructure in tectonically active regions to reflect ongoing deformation.

Our country is located in a region characterized by active seismic zones. Over the past 30 years, there have been 25 earthquakes with magnitudes greater than M:6. Postseismic movements occurred along faults after these earthquakes often differ significantly from preseismic motions. As a result, using pre-earthquake velocities for establishing new geodetic points in the aftermath of an earthquake can lead to epoch translation errors. Moreover, several microplates (or tectonic blocks) with varying kinematic characteristics exist on the Anatolian Plate. Due to the differing velocities of these microplates, it is crucial to select reference points—such as those from TNFGN and TNPGN-Active—that lie on the same tectonic block when interpolating velocities for newly established points. This approach ensures more homogeneous velocity estimates and leads to more accurate results. However, velocity values from TNFGN and TNPGN-Active points with a limited number of GNSS campaigns and high standard deviations should not be used. The unreliability of these velocities may introduce significant computational errors, and such points should be excluded from analytical evaluations.

This study represents a significant step toward emphasizing the importance of updating Turkey's geodetic network and identifying earthquake-induced deformations within it. The time series and tectonic coherence of GPS stations distributed across Turkey have been examined in detail under the complex influences of earthquakes occurring both within the country and its surrounding regions. This research holds critical importance for ensuring the continuity of Turkey's geodetic infrastructure and for gaining a more comprehensive understanding of seismic effects. The analysis presented in this study marks a substantial advancement in both geodetic and seismic research. In earthquake-prone regions such as Turkey, accurately interpreting GPS data and reliably assessing seismic risks is of vital importance. This research contributes to improved preparedness against future earthquake hazards and enhances societal resilience. As a result, the effectiveness of infrastructure development, disaster management, and emergency response strategies can be significantly increased.

Conflict of interest

The author declares that there are no conflicts of interest.

Similarity rate (iThenticate): %12

References

[1] A.M.C. Şengör, N. Görür and F. Şaroğlu, Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study. The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication, 37, 227-264, 1985. https://doi.org/10.2110/pec.85.37.0211

[2] A. Koçyiğit, Orta Anadolu'nun genel neotektonik özellikleri ve depremselliği. Türkiye Petrol Jeologları Derneği, Özel Sayı 5, 1-26, 2003.

[3] S. McClusky, S. Balassanian, A. Barka, C. Demir, S. Ergintav, I. Georgiev, O. Gurkan, M. Hamburger, K. Hurst, H. Kahle, K. Kastens, G. Kekelidze, R. King, V. Kotzev, O. Lenk, S. Mahmoud, A. Mishin, M. Nadariya, A. Ouzounis, D. Paradissis, Y. Peter, M. Prilepin, R. Reilinger, I. Sanli, H. Seeger, A. Tealeb, M. N. Toksöz and G. Veis, Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 105(B3), 5695-5719, 2000. https://doi.org/10.1029/1999JB900351

[4] R. Reilinger, S. McClusky, P. Vernant, S. Lawrence, S. Ergintav, R. Cakmak, H. Ozener, F. Kadirov, I. Guliev, R. Stepanyan, M. Nadariya, G. Hahubia, S. Mahmoud, K. Sakr, A. ArRajehi, D. Paradissis, A. Al-Aydrus, M. Prilepin, T. Guseva, E. Evren, A. Dmitrotsa, S. V. Filikov, F. Gomez, R. Al-Ghazzi and G. Karam, GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 111(B5), 2006. https://doi.org/10.1029/2005JB004051

[5] B. Aktug, O. Lenk, M.A. Gurdal and A. Kilicoglu, Establishment of regional reference frames for detecting active deformation areas in Anatolia. Studia Geophysica et Geodaetica, 53 (2), 169–183, 2009. https://doi.org/10.1007/s11200-009-0011-0

[6] A.M.C. Şengör, Türkiye'nin neotektoniğinin esasları (Fundamentals of the neotectonics of Turkey). In Geological Society of Turkey. Conference Series (2), 1980.

[7] B. Oral, R. Reilinger, M.N. Toksoz, R.W. King, A. Barka, I. Kınık and O. Lenk, Global Positioning System (GPS) Offen Evidence of Plate Motions in, Eastern

Mediterranean. EOS 76, 9–11, 1995. https://doi.org/10.1029/EO076i002p00009-01

[8] U.İ. Sevimli, K. Zorlu ve U, Bağcı, Yazıhan (Malatya) Dolayının Neotektonik Özellikleri Volkaniklerin Petrografisi ve Jeokimyası. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20(4), 143-157, 2017. https://doi.org/10.17780/ksujes.342080

[9] İ. Ketin, Kuzey anadolu fayı hakkında. M.T.A. Dergisi, 72: 1-27, 1969.

[10] A.I. Okay, E. Demirbağ, H. Kurt, N. Okay and İ. Kuşçu, An active, deep marine strike slip basin along the North Anatolian fault in Turkey. Tectonics, 18 (1): 129- 147, 1999. https://doi.org/10.1029/1998TC900017

[11] Ö. Emre, T.Y. Duman, S. Özalp, H. Elmacı, Ş. Olgun and F. Şaroğlu, Active Fault Map of Turkey. General Directorate of Mineral Research and Exploration, Ankara, Türkiye, 2013.

[12] AFAD, Earthquake Catalogue. Prime Ministry, Disaster and Emergency Management Presidency, Earthquake Department. 2025. https://deprem.afad.gov.tr/event-catalog, Accessed 11 December 2024.

[13] Ö. Emre, T.Y. Duman, S. Özalp, F. Şaroğlu, Ş. Olgun, H. Elmacı and T. Çan, Active fault database of Turkey. Bull Earthquake Eng, 16, 3229–3275, 2018.

[14] K. Aladoğan, M.N. Alkan, İ. Tiryakioğlu, H. H. Yavaşoğlu, H. İ. Solak, C. Gezgin, A. Özkan , E. E. Eyübagil , F. Şahiner , E. B. Çakanşimşek and Z. Köse, Preliminary Results on Deformations of the Central North Anatolian Fault Zone. Hittite Journal of Science and Engineering, 11(3), 115-122, 2024. https://doi.org/10.17350/HJSE19030000338

[15] E. Arpat and F. Şaroğlu, The East Anatolian Fault System: Thoughts on Its Development. Mineral Research and Exploration Institute of Turkey Bull, 78,33-39, 1972.

[16] R. Westaway, Present-day kinematics of the Middle East and eastern Mediterranean. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 99(B6), 12071-12090, 1994. https://doi.org/10.1029/94JB00335

[17] B. Aktuğ, H. Özener, A. Dogru, A. Sabuncu, B. Turgut, K. Halıcıoğlu, O. Yilmaz and E. Havazli, Slip Rates and Seismic Potential on The East Anatolian Fault System Using an Improved GPS Velocity Field. Journal of Geodynamics, 94-95, 1-12, 2016. https://doi.org/10.1016/j.jog.2016.01.001

[18] A. Özkan, H. İ. Solak, İ. Tiryakioğlu, M. D. Şentürk, B. Aktuğ, C. Gezgin, F. Poyraz, H. Duman, F. Masson, G. Uslular, C. Ö. Yiğit and H. H. Yavaşoğlu, Characterization of the co-seismic pattern and slip distribution of the February 06, 2023, Kahramanmaraş (Turkey) earthquakes (Mw 7.7 and Mw 7.6) with a dense GNSS network. Tectonophysics, 866, 230041, 2023. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.230041

[19] H. İ. Solak, M. D. Şentürk, E. B. Çakanşimşek, Ş. Ş. Yaşar, E. E. Eyübagil, A. O. Erdoğan, B. Aktuğ, C. Ö Yiğit and İ. Tiryakioğlu, Earthquake magnitude estimation based on peak ground displacements recorded by high-rate GNSS for February 6, 2023, earthquake sequence in Turkiye. The European Physical Journal Plus, 139(9), 817, 2024. https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-024-05576-3

[20] KOERI, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute—Istanbul, Turkey. Bogazici University Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute [Data Set]. Available online: https://www.fdsn.org/networks/detail/KO/, Accessed 12 January 2025.

[21] K. Dirik, and M. C. Göncüoğlu, Neotectonic characteristics of Central Anatolia. International Geology Review, 38, 807-817, 1996. https://doi.org/10.1080/00206819709465363

[22] A. Koçyiğit, and A. Beyhan, A new intracontinental transcurrent structure: the Central Anatolian Fault Zone, Turkey. Tectonophysics, 284, 317-336, 1998. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(97)00176-5

[23] A. Koçyiğit, and A. A. Özacar, Extensional neotectonic regime through the NE edge of the outer Isparta angle, SW Turkey: new field and seismic data. Turkish Journal of Earth Sciences, 12, 1, 67-90, 2003.

[24] A. Kürçer, and E. Y. Gökten, Neotectonic-Period Characteristics, Seismicity, Geometry and Segmentation of the Tuz Gölü Fault Zone. Maden Tetkik ve Arama Dergisi, 149, 149, 19-68, 2014. https://doi.org/10.19111/bmre.94099

[25] E. Altunel ve A. Barka, Eskişehir fay zonimun İnönü-Sultandere arasında neotektonik aktivitesi. Geological Bulletin of Turkey, 41(2), 41-52, 1998.

[26] Ş. Gürboğa, O. Gökçe ve M. K. Tüfekçi, Türkiye'de Yüzey Faylanması Tehlikesinin Değerlendirilmesi ve Fay Sakınım Bantlarının Oluşturulması. MTA Doğal Kay. ve Eko. Bült, 21, 29-45, 2016.

[27] Ö. Emre, T. Y. Duman, A. Doğan, S. Özalp, F. Tokay, and İ. Kuşcu, Surface Faulting Associated with the Sultandağı Earthquake (Mw6.5) of 3 February 2002, Southwestern Turkey. Seismological Research Letters 74 (4), 382-392, 2003. https://doi.org/10.1785/gssrl.74.4.382

[28] S. Akyüz, G. Uçarkuş, D. Şatır, A. Dikbaş ve Ö. Kozacı, 3 Şubat 2002 Çay depreminde meydana gelen yüzey kırığı üzerinde paleosismolojik araştırmalar. Yerbilimleri, 27 (1), 41-52, 2006.

[29] Ç. Özkaymak, H. Sözbilir, İ. Tiryakioğlu ve T. Baybura, Bolvadin'de (Afyon-Akşehir Grabeni, Afyon) gözlenen yüzey deformasyonlarının jeolojik, jeomorfolojik ve jeodezik analizi. Türkiye Jeoloji Bülteni, 60(2), 169-189, 2017. https://doi.org/10.25288/tjb.302914

[30] E. E Eyübagil, Ş. Ş. Yaşar, E. B. Çakanşimşek, H. Duman, H. İ. Solak, A. Özkan, C. Gezgin, H. H. Yavaşoğlu, İ. Tiryakioglu, F. Poyraz, B. Aktuğ, C. Ö. Yiğit, Ç. Özkaymak, H. Özener, 6 Şubat 2023 Sofalaca-Şehitkamil Gaziantep (Mw: 7.7) ve Ekinözü Kahramanmaraş (Mw: 7.6) Depremlerinin GNSS Gözlemlerine Bağlı Öncül Sonuçları. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi,

23(1), 160-176, 2023. https://doi.org/10.35414/akufemubid.1251601

[31] E. Aksoy, E. Akgun, M. Softa, F. Kocbulut, H. Sozbilir, O. Tatar and S.C. Erol, Effect on the Eastern Anatolian Fault Zone Erkenek and Pazarcik segments of the 6 February 2023 Pazarcik (Kahramanmaras) earthquake: observafions from Celikhan-Golbasi (Adiyaman). Turk Deprem Arastirma Dergisi, 5, 85-104, 2023. https://doi.org/10.46464/tdad.1280408

[32] V. Karabacak, Ç. Özkaymak, H. Sözbilir, O. Tatar, B. Aktuğ, Ö. C. Özdağ, R. Çakir, E. Aksoy, F. Koçbulut, M. Softa, E. Akgün, A. Demir and G. Arslan, The 2023 Pazarcık (Kahramanmaraş, Türkiye) earthquake (Mw 7.7): Implications for surface rupture dynamics along the East Anatolian fault zone. Journal of the Geological Society, 180(3), jgs2023-020, 2023. https://doi.org/10.1144/jgs2023-020

[33] M. Softa, F. Koçbulut, E. Akgün, E. Aksoy, H. Sözbilir, O. Tatar, V. Karabacak, Ç. Özkaymak, M. Utku, Ö. C. Özdağ, R. Çakır, A. Demir and G. Arslan, Surface rupture during the 6th of February 2023 Mw 7.6 Elbistan-Ekinözü (Kahramanmaraş) earthquake: implications for fault rupture dynamics along the northern branch of East Anatolian Fault Zone. Turkish Journal of Earth Sciences, 33(1), 1-21, 2024. https://doi.org/10.55730/1300-0985.1895

[34] İ. Tiryakioğlu, F. Koçbulut, C. Gezgin, H.İ. Solak, E.E. Eyübagil, E.B. Çakanşimşek, K. Aladoğan, E. Dönmez ve F. Poyraz, 6 Şubat Kahramanmaraş depremleri sonrasında Ecemiş Fayı'nda meydana gelen kabuksal deformasyonların GNSS yöntemiyle belirlenmesi. Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 14(2), 913-931, 2024. https://doi.org/10.31466/kfbd.1452339

[35] T.Y. Duman, Ö. Emre, S. Özalp, T. Çan, Ş. Olgun, H. Elmacı ve F. Şaroğlu, Türkiye ve Yakın Çevresindeki Diri Faylar ve Özellikleri. Türkiye Sismotektonik Haritası Açıklama Kitabı, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Özel Yayınlar Serisi 34, 12, 2017.

[36] E. Gülal, A. A. Dindar, B. Akpınar, İ. Tiryakioğlu, N. O. Aykut and H. Erdoğan, Analysis and management of GNSS reference station data. Tehnički vjesnik 22, 2(2015), 407-414, 2015. https://dx.doi.org/10.17559/TV-20140717125413

[37] E. Dönmez ve İ. Tiryakioğlu, Gediz fayı yerkabuğu hareketlerinin GNSS gözlemleri ile izlenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 18(3), 1110-1117, 2018. https://doi.org/10.5578/fmbd.67776

[38] C. Gezgin, İ. Tiryakioğlu, S. Ekercin ve E. Gürbüz, Tuz Gölü fay zonu (TGFZ) Güney kesimine ait tektonik hareketlerin GNSS gözlemleri ile izlenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20(3), 456-464, 2020. https://doi.org/10.35414/akufemubid.690886

[39] C. Gezgin, S. Ekercin, İ. Tiryakioğlu, B. Aktuğ, H. Erdoğan, E. Gürbüz, O. Orhan, S. S. Bilgilioğlu, A. T. Torun, H. İ. Gündüz, O. Oktar, C. Türkmen and E. Kaya, Determination of recent tectonic deformations along the Tuz Gölü Fault Zone in Central Anatolia (Turkey) with GNSS observations. Turkish Journal of Earth Sciences, 31(1), 20-33, 2022. https://doi.org/10.3906/yer-2108-10

[40] H. İ. Solak, İ. Tiryakioğlu, S. Yalvaç, C. Ö. Yiğit, B. Aktuğ, H. Özener, E. Dönmez, E. Demirelli, E. E. Eyübagil, E. B. Çakanşimşek, C. Gezgin ve F. Şahiner, 30 Ekim 2020 Mw: 6.9 Sisam Depremi Sonrası İzmir ve Çevresinde Postsismik Deformasyonların İzlenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 24(6), 1442-1455, 2024. https://doi.org/10.35414/akufemubid.1465489

[41] İ. Tiryakioğlu, Ç. Özkaymak, H. İ. Solak, M. Öztürk, B. E. Akyar, E. E Eyübagil and E. B. Çakanşimşek, Jeodezik ölçülerle Banaz Fayı'nın güncel tektonik deformasyonu, Akşehir-Simav Fay Sistemi, Batı Anadolu. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13(3), 2024. https://doi.org/10.28948/ngumuh.1448674

[42] Ş. Ş. Yaşar, İ. Tiryakioğlu, B. Aktuğ, H. Erdoğan, Ç. Özkaymak, Determination of Anatolian Plate's tectonic block boundaries with clustering analysis using GNSS sites velocities. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 16(1), 2446588, 2025. https://doi.org/10.1080/19475705.2024.2446588

[43] İ. Tiryakioğlu, C. O. Yigit, Ç. Ozkaymak, T. Baybura, M. Yilmaz, M. A. Ugur, M. Yalcin, F. Poyraz, H. Sözbilir and V. E. Gulal, Active surface deformations detected by precise levelling surveys in the Afyon-Akşehir Graben, Western Anatolia, Turkey. Geofizika, 36(1), 33-52, 2019. https://doi.org/10.15233/gfz.2019.36.4

[44] E. Zelenin, D. Bachmanov, S. Garipova, V. Trifonov, A. Kozhurin, The database of the active faults of Eurasia (AFEAD): Ontology and design behind the continental-scale dataset. Earth System Science Data Discussions, 2021, 1-20, 2021. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25509.58084

[45] Ş. Ş. Yaşar, Kümeleme analizi ile Batı Anadolu tektonik blok modelinin belirlenmesi, Doktora Tezi (Ph.D. Thesis), Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, 135, 2024.

[46] E. Köktürk ve E. Köktürk, Depremler Sonrası Türkiye Kadastrosu ve Taşınmaz Mülkiyeti Dizgesi Üzerine Düşünceler", Deprem Sempozyumu- Kocaeli Üniversitesi, 23-25 Mart 2005, 2005.

[47] O. Ergünay, Türkiye'nin afet profili. TMMOB afet sempozyumu bildiriler kitabı, 5(7), 1-14, 2007.

[48] T. Çay ve Ö. Acar, Deprem Sonrası Mülkiyet Sınırları: Kahramanmaraş Örneği. I. Uluslararası İstiklal Sempozyumu, 2024.

[49] M. E. Ayhan, C. Demir, O. Lenk, A. Kılıçoğlu, B. Aktuğ ve M. Açıkgöz, Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı-1999A (TUTGA-99A), Harita Dergisi Özel Sayı, No.16, Ankara, 2002.

[50] B. Aktuğ, S. Seymen, M. Kurt, E. Parmaksız, O, Lenk, S. Sezer ve S. Özdemir, ED-50 (European Datum-1950) ile TUREF (Türkiye Ulusal Referans Çerçevesi)

Arasında Datum Dönüşümü, Harita Genel Komutanlığı, Harita Dergisi, 146, Ankara, 2011.

[51] İ. Tiryakioglu, H. H. Yavaşoglu, M. A. Ugur, Ç., Ozkaymak, M. Yılmaz, H. Kocaoglu and B. Turgut, Analysis of October 23 (Mw 7.2) and November 9 (Mw 5.6), 2011 Van earthquakes using long-term GNSS time series. Earth Science Research Journal, 21(3), 147-156, 2017.

[52] İ. Tiryakioğlu, B. Aktuğ, C. O. Yiğit, H. H. Yavaşoğlu, H., Sözbilir, Ç. Özkaymak, F. Poyraz, E. Taneli, F. Bulut, A. Doğru ve H. Özener, GPS Ölçülerinden 20 Temmuz 2017 Kos Depremi (Mw6.6) Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi, 21. Aktif Tektonik Araştırma Gurubu Toplantıları (ATAG 21), 26-28 Ekim 2017, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, 2017.

[53] TUREF Hız Alani, 2020 Bilgilendirme Dokümanı. Available online: https://turefhizalani.harita.gov.tr/, Accessed 12 January 2025.

[54] B. Aktuğ, S. Sezer, S. Özdemir, O. Lenk ve A. Kiliçoğlu, Türkiye Ulusal Temel Gps Ağı Güncel Koordinat Ve Hızlarının Hesaplanması (Computation Of The Actual Coordinates And Velocities Of Turkish National Fundamental GPS Network). Harita Dergisi, 145(2011), 1-14, 2011.

[55] A. İ. Kurt, A. Cingöz, S. Özdemir, S. Peker, Ö. Özel ve M. Simav, Türkiye Ulusal Temel GNSS Ağı (TUTGA) güncel koordinat ve hızlarının GNSS verilerinin yeniden değerlendirilmesi kapsamında hesaplanması. Harita Dergisi, 86(164), 1-17, 2020.

[56] H. Balaban, H. İ. Solak, İ. Tiryakioğlu, C1-C2 Noktalarının Enterpolasyon Yöntemiyle Elde Edilen GNSS Hızlarına Ait Doğrulukların Araştırılması. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23(3), 722-729, 2023. https://doi.org/10.35414/akufemubid.1234261

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 1026-1034

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Arızlı (Afyon-Şuhut) ofiyolitik melanjında krizotil oluşumlarının mineralojik, petrografik ve jeokimyasal karakterizasyonu

Mineralogical, petrographical and geochemical characterization of chrysotile in the Arızlı ophiolitic mélange (Afyon-Şuhut, Türkiye)

Cihan Yalçın[1,*], Mustafa Kaya[2]

1 SRG Mühendislik Danışmanlık LTD ŞTİ, 20100, Denizli, Türkiye
[2] İstanbul Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 34100, İstanbul, Türkiye

Öz

Bu çalışma, Afyonkarahisar ili Şuhut ilçesi Arızlı mevkiindeki ofiyolitik melanj birimleri içerisinde yer alan krizotil (lifsi serpantin) mineralizasyonunun mineralojik, petrografik ve jeokimyasal özelliklerini incelemektedir. Altı farklı örnek üzerinde Raman spektroskopisi, Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), taramalı elektron mikroskobu–enerji dağılımı spektroskopisi (SEM–EDS) ve X-ışını floresans (XRF) analizleri yapılmıştır. Raman analizlerinde krizotile ait karakteristik bantlar (686, 521, 376 ve 230 cm^{-1}) net şekilde gözlenmiş; bazı örneklerde lizardit (687, 458, 377 cm^{-1}) ve antigorit spektral izleri de tespit edilmiştir. FTIR spektrumlarında, OH bağlarını gösteren 3682 cm^{-1}, Si–O–Mg ve Si–O–Si gerilme titreşimlerine karşılık gelen 943 ve 602 cm^{-1} bantları gözlenmiştir. SEM görüntülerinde, liflerin 5–200 µm arasında değişen uzunluklarda olduğu ve tipik sarmal yapılar geliştirdiği belirlenmiştir. EDS analizleri Mg (%43.6 MgO'ya kadar), Si (%43.4 SiO_2'ye kadar) ve düşük miktarda Fe ile krizotilin teorik bileşimiyle uyumludur. XRF analizlerinde MgO %35.34–39.21 ve SiO_2 %35.34–40.52 aralığında, Fe_2O_3 %6.39–7.31, Ni 1186–1588 ppm, Cr_2O_3 %0.21–0.36 oranlarında belirlenmiş olup bu değerler serpantinleşmiş ultramafik kayaçlara işaret etmektedir. Özellikle yüksek Ni ve Cr içerikleri, mineralizasyonun ultramafik kayaç kökenli olduğunu düşündürmektedir. Elde edilen tüm veriler, Arızlı'daki krizotil mineralizasyonunun Türkiye'deki Sivas, Tekirova ve Karaçam gibi benzer ofiyolitik ortamlarda tanımlanan doğal serpantin oluşumları ile mineralojik ve jeokimyasal açıdan benzerlik taşıdığını ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Krizotil, Ofiyolitik melanj, FTIR, SEM-EDS, Jeokimya

Abstract

This research examines the mineralogical, geochemical, and microscopic properties of chrysotile (fibrous serpentine) mineralization in the ophiolitic mélange units of the Arızlı locality in Şuhut, Afyonkarahisar, Türkiye. A comprehensive assessment of six distinct rock samples was conducted using Raman spectroscopy, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), scanning electron microscopy–energy dispersive spectroscopy (SEM–EDS), and X-ray fluorescence (XRF) examination. Raman spectra exhibited specific bands indicative of chrysotile (686, 521, 376, and 230 cm^{-1}), with some samples also displaying peaks for lizardite (687, 458, 377 cm^{-1}) and antigorite. FTIR spectra exhibited significant absorption bands at 3682 cm^{-1} (O–H), 943 cm^{-1}, and 602 cm^{-1}, corresponding to Si–O–Mg and Si–O–Si stretching vibrations. SEM examinations verified the existence of fibrous morphologies between 5 and 200 µm in length, exhibiting distinctive spiral and elongated shapes. EDS examination revealed elevated concentrations of Mg and Si, aligning with the optimal chrysotile composition (up to 43.6% MgO and 43.4% SiO_2). XRF analysis revealed MgO concentrations ranging from 35.34% to 39.21%, SiO_2 from 35.34% to 40.52%, Fe_2O_3 from 6.39% to 7.31%, and Ni levels between 1186 and 1588 ppm. The Cr_2O_3 concentration varied from 0.21% to 0.36%, suggesting an ultramafic origin. Elevated amounts of Ni and Cr indicate a potential origin from olivine-rich protoliths. The findings suggest that the chrysotile deposit in Arızlı has mineralogical and geochemical similarities to naturally occurring serpentine described in other Turkish ophiolitic regions, including Sivas, Tekirova, and Karaçam.

Keywords: Chrysotile, Ophiolitic mélange, FTIR, SEM-EDS, Geochemistry

1 Giriş

Serpantin mineralleri özellikle yüksek ısıya, kimyasallara ve gerilmeye karşı dayanıklılığı nedeniyle 20. yüzyıl boyunca birçok endüstriyel uygulamada kullanılmıştır [1]. Bu minerallerin en yaygın formu olan krizotil ($Mg_3Si_2O_5(OH)_4$) ise özellikle ultramafik kayaçların serpantinleşmesi süreciyle gelişir [2-3]. Krizotilin lifsi yapısı ve elastik özellikleri, onu hem ekonomik hem de çevresel yönden dikkat çekici kılmaktadır [4]. Krizotil lifleri, sıklıkla damarlar boyunca uzanan "cross-fiber" ve "slip-fiber" tiplerinde gelişim gösterir [5].

Serpantin grubu minerallerin oluşumu; sıcaklık, basınç, akışkan bileşimi ve deformasyon gibi etkenlerin karmaşık etkileşimiyle belirlenmektedir [6]. Bu minerallerin lifsi

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: cihan.yalcin@sanayi.gov.tr (C. Yalçın)
Geliş / Received: 09.04.2025 Kabul / Accepted: 28.05.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1672453

morfolojilerinin tespiti ve ayrımı, optik mikroskopi (OM), taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını kırınımı (XRD), Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopi (FTIR) ve Raman spektroskopisi gibi çeşitli ileri analiz teknikleriyle sağlanmaktadır [7-8]. Literatürde, krizotil ve diğer serpantin polimorflarının mikro-yapısal ayrımı üzerine son yıllarda yapılan çalışmalar, bu liflerin morfolojik özelliklerinin tespiti ve sağlık risklerinin değerlendirilmesinde büyük katkı sağlamaktadır [9-10].

Türkiye'de asbest oluşumları, genellikle ofiyolitik kuşaklarla ilişkilidir. Arızlı (Afyon-Şuhut) bölgesi, Neotetis okyanusunun kapanma evrelerine bağlı olarak gelişmiş İzmir-Ankara-Erzincan Bindirme Zonu (İAEBZ) içerisinde yer almakta ve ofiyolitik melanj yapısıyla karakterize edilmektedir [11].

Bölgede gözlenen krizotil mineralizasyonu, ultramafik-serpantinitik kayaçlar içerisindeki hidrotermal ve tektonik süreçlerin bir ürünüdür [12]. Bu tür oluşumların benzerleri, Tekirova, Sivas ve Karaçam (Eskişehir) gibi Türkiye'nin farklı ofiyolitik kuşaklarında da tanımlanmıştır [13-14].

Son yıllarda yapılan çalışmalar, krizotilin jeokimyasal iz bileşenlerinin izlenmesi ve çok değişkenli istatistiksel analizler ile liflerin çevresel etkilerinin değerlendirilmesine odaklanmıştır [2,15]. Bununla birlikte, asbest minerallerinin "zararlı element içeriği", termal davranışı ve çevresel risk değerlendirmeleri konularında çoklu analitik yaklaşım önerilmektedir [4,7]. Ricchiuti ve ark. [7] tarafından İtalya'daki tremolit asbestleri üzerinde yapılan kapsamlı çalışma, benzer lifli minerallerin ağır metal içeriğine işaret ederken; Upadhyay [10] tarafından 2025'te yapılan çalışmada, asbestin endüstriyel mineral potansiyelini yeniden değerlendirerek ekonomik potansiyelini ortaya koymuştur.

Bu çalışmanın amacı, Arızlı (Afyon-Şuhut) bölgesinde ofiyolitik melanj birimleri içerisinde gelişmiş krizotil mineralizasyonunun mineralojik, mikroskobik, jeokimyasal ve spektroskopik yöntemlerle detaylı bir şekilde karakterize edilerek, bu oluşumun Türkiye'deki diğer ofiyolitik serpantin sahalarıyla benzerliğini ortaya koymaktır.

2 Materyal ve metot

Bu çalışmada, Afyonkarahisar–Şuhut yöresinde yer alan Arızlı ofiyolitik melanj birimindeki serpantinlerden toplam altı adet kayaç örneği arazi çalışmaları sırasında el örneklemesi yöntemiyle temin edilmiştir. Numunelerin toplanmasında özellikle serpantinleşmiş ultramafik birimlerin yüzeylenme alanlarına ve gözle ayırtlanabilir lifsi doku özelliklerine dikkat edilmiştir.

Laboratuvar analizlerinden önce tüm örnekler homojenize edilmek amacıyla öğütülmüştür. Öğütme işlemi, tungsten karbür içeren öğütme haznesine sahip RETSCH RS-200 model dairesel öğütücü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Jeokimyasal analizler İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Jeokimya Araştırma Laboratuvarı'nda yürütülmüş olup, başlıca oksit içerikleri (SiO_2, MgO, Fe_2O_3, vb.), BRUKER S8 TIGER model X-Işını Floresans (XRF) cihazı ile 0.01–12 µm dalga boyu aralığında tespit edilmiştir. Analizlerde, cihazların kalibrasyonları uluslararası standartlara göre yapılmış ve sonuçlar yüksek doğrulukla elde edilmiştir.

Mineralojik ve dokusal özelliklerin belirlenmesi amacıyla Raman spektroskopisi, FTIR (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi) ve SEM-EDS (Taramalı Elektron Mikroskobu–Enerji Dağılımlı Spektroskopi)tekniklerinden yararlanılmıştır. Raman analizleri, 633 nm dalga boyunda çalışan lazer kaynağına sahip Horiba Jobin-Yvon marka cihaz kullanılarak yapılmıştır. Ölçümler sırasında örnek yüzeyine odaklama, 10X, 50X ve 100X uzun odaklı objektiflerle gerçekleştirilmiş; bu objektifler sırasıyla 65 mm ve 13 mm çalışma mesafesiyle 5 µm ve 2 µm yanal çözünürlük sağlamıştır. Spektral veriler, Labspec 4.02 yazılımı aracılığıyla değerlendirilmiş, başlangıçta teorik mod konumlarına göre taban çizgisi çıkarılarak, pik ayrımları Gaussian-Lorentzian karışım fonksiyonlarıyla yapılmıştır.

FTIR analizleriyle mineralin fonksiyonel gruplarına ait karakteristik absorbsiyon bantları belirlenmiştir. Bu analizler, özellikle Si-O, Mg-OH ve su içerikleri gibi karakteristik bağlanmaların yorumlanmasında kullanılmıştır. Elde edilen spektrumlar, önceden tanımlanmış krizotil minerali verileriyle karşılaştırılmıştır.

Mikroskobik ve morfolojik tanımlamalar için SEM-EDS analizleri Ankara Üniversitesi YEBİM laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Numunelerin ince kesitleri üzerine yapılan spot analizler ve yüzey haritalamaları ile minerallerin hem yapısal hem de kimyasal özellikleri belirlenmiştir. 200x, 3000x, 10000x gibi farklı büyütme oranlarında gerçekleştirilen görüntüleme işlemleri sayesinde krizotil liflerinin yönlenme, yoğunluk ve boyutsal dağılım karakteristikleri detaylı biçimde incelenmiştir. EDS sistemi, yüzeyden yayılan karakteristik X-ışınlarının tespiti yoluyla, lokal element dağılımını ortaya koymuştur.

Tüm analizler uluslararası standartlara uygun olarak yürütülmüş olup, elde edilen veriler, krizotil mineralizasyonunun niteliksel ve niceliksel değerlendirilmesine temel teşkil etmiştir.

2.1 Jeolojik özellikler ve arazi gözlemleri

Çalışma alanı, Batı Anadolu ofiyolitik kuşağı üzerinde yer alan ve Neotetis Okyanusu'nun kapanma süreciyle ilişkili olarak şekillenmiş Arızlı (Afyon-Şuhut) bölgesini kapsamaktadır. Bu bölge, İzmir–Ankara–Erzincan Bindirme Zonu (İAEBZ) içerisinde yer almakta olup, karmaşık tektonik yapısı ve ofiyolitik birlikleri ile dikkat çekmektedir [11, 12].

İnceleme alanında Mesozoik yaşlı karbonat platformları, Jura–Kretase istifleri, ofiyolitik melanj ve Tersiyer yaşlı [16] karasal çökeller yüzlek verir (Şekil 1).

Stratigrafik olarak en yaşlı birim, Orta Triyas–Üst Triyas yaşlı kireçtaşları olup bu birim, gri ve koyu gri renkli, kalın tabakalı, sert ve yer yer dolomitik özellikte kalsit içeren karbonat kayalardan oluşur. Üzerinde yer alan Jura–Kretase yaşlı kireçtaşları, açık gri renkli, daha ince tabakalanmalı ve fosilli yapısıyla ayırt edilebilen karbonat fasiyesindedir (Şekil 1). Stratigrafik istifin bir üst seviyesinde, Kretase yaşlı kireçtaşları gözlenmektedir. Bu birim, kırık ve faylanmış yapıda olup yer yer masif, yer yer tabakalanmış görünüm

sunar. Söz konusu karbonat kayaçları, bölgesel tektonik etkinlikler sonucu metamorfizmaya kısmen maruz kalmıştır. Kireçtaşlarının üzerine uyumsuz olarak gelen Üst Kretase yaşlı ofiyolitik melanj birimi, çalışma alanının en dikkat çekici ve önemli jeolojik bileşenidir. Bu birim, serpantinit, harzburjit, gabro parçaları ve radyolarit bloklarını içeren, matrisi genellikle serpantinleşmiş peridotit olan heterojen yapılı bir birimdir. Bu melanj içinde yer alan ultramafik kayaçlarda krizotil tipi serpantin mineralizasyonu gelişmiştir (Şekil 2).

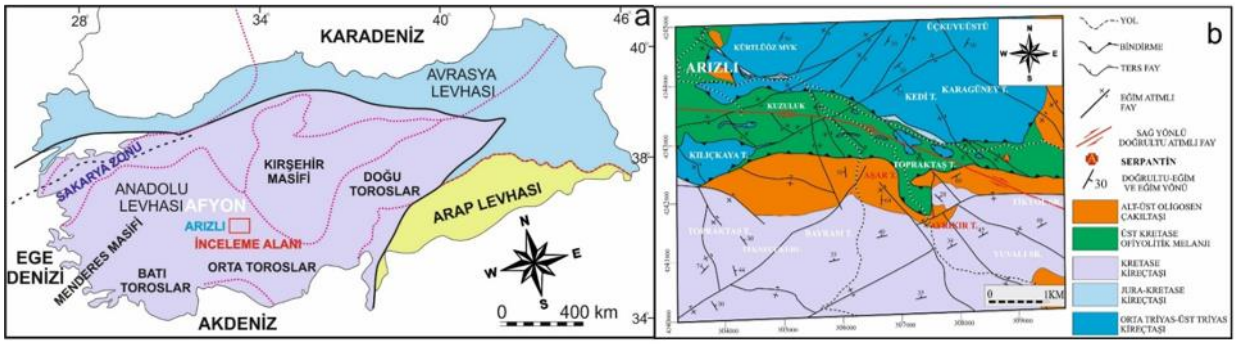
Kuzeybatı-güneydoğu uzanımlı sağ yönlü doğrultu atımlı fay, ofiyolitik birimlerin şekillenmesinde ve krizotil liflerinin lokalizasyonunda kritik rol oynamaktadır. Fay zonları boyunca gelişen kırık ve çatlak sistemleri, hem hidrotermal akışkanların dolaşımına olanak tanımış hem de lifli serpantin minerallerinin oluşumuna uygun mikro-ortamlar yaratmıştır.

Çalışma alanında yapılan detaylı jeolojik haritalama ve gözlemler sonucunda, krizotil (lifsi serpantin) yalnızca Üst Kretase yaşlı ofiyolitik melanj birimi içerisinde, özellikle serpantinit ve kısmen tektonize harzburjit seviyelerinde geliştiği tespit edilmiştir. İncelenen örneklerde krizotil tanımlaması, öncelikle lifsi morfolojisine ilişkin mikroskobik gözlemlerle yapılmış; bu tanımlama daha sonra spektroskopik bulgularla desteklenmiştir

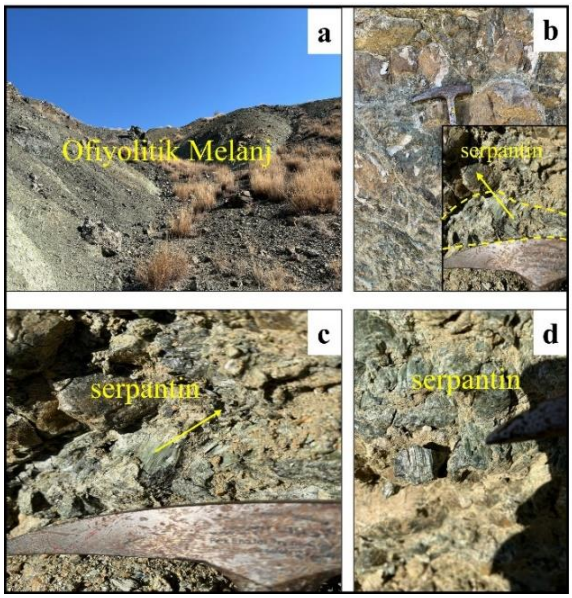
Krizotil damarları, genellikle fay zonlarına paralel ya da çatlak dolgusu şeklinde gözlenmiş, kısmen boşlukları doldurur tarzda bantlı yapı oluşturmuştur.

Saha gözlemlerinde, ofiyolitik melanj biriminin yeşilimsi-gri renkte, yüksek derecede ayrışmış ve parçalanmış yapıda olduğu belirlenmiştir (Şekil 2a). Bu birim içerisinde, yer yer birkaç santimetre kalınlığında krizotil damarlarına rastlanmakta, bu damarlar belirgin şekilde yeşilimsi lifsi morfolojisi ile kolayca ayırt edilebilmektedir (Şekil 2b–2d). Krizotil lifleri, genel olarak zonal bir dağılım göstermez; ancak yerel olarak kırık-zayıflık zonları boyunca yoğunlaşma eğilimindedir.

Krizotil liflerinin kristallenme tarzı, kayaçların mikrotektonik yapısı ile doğrudan ilişkilidir. Lifler, damar duvarlarına dik doğrultuda gelişim göstererek klasik "cross-fiber" yapılarını oluşturmuştur. Bu yönelim, bölgedeki gerilme rejimiyle uyumlu olarak tektonik zayıflık zonları boyunca yoğunlaşmıştır. Bu yapı, krizotilin tipik damar içi kristallenme alışkanlığıyla örtüşmektedir.



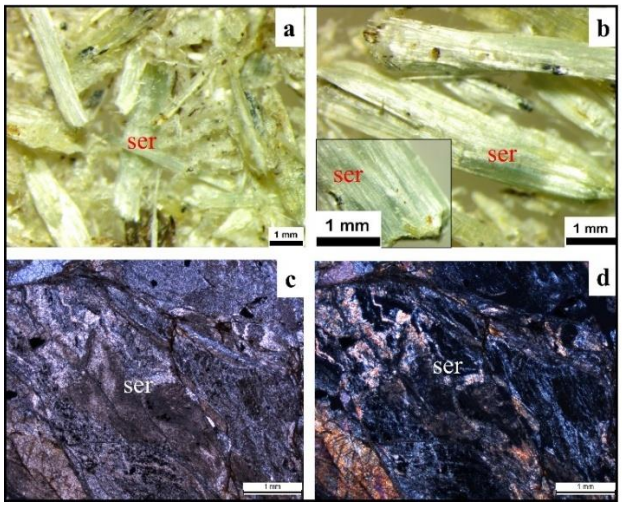
Şekil 1. (a) İnceleme alanının tektonik konumu, (b) İnceleme alanının 1/25.000 ölçekli jeoloji haritası (MTA, [16] paftasından değiştirilmiştir).



Şekil 2. İnceleme alanının genel görünümü, (a) Ofiyolitik melanj birimleri, (b-c-d) serpantin yüzlekleri.

3 Bulgular

Binoküler mikroskop altında yapılan incelemelerde (Şekil 3a–b), örneklerde uzunlukları birkaç milimetreye ulaşan, lifsi yapıda, iğnemsi formda gelişmiş beyazımsı-yeşilimsi mineraller gözlenmiştir. Bu lifsi yapıların genellikle dağınık halde bulundukları ve bir kısmının paralel dizilim gösterdiği dikkati çekmektedir. Polarizan mikroskop kesitlerinde (Şekil 3c–d), serpantin grubu minerallerin elek dokuları net olarak ayırt edilmiştir. Raman spektroskopik analizler üç farklı örnek üzerinde gerçekleştirilmiş olup, her biri karakteristik titreşim bantları ile serpantin grubu minerallerin varlığını doğrulamıştır

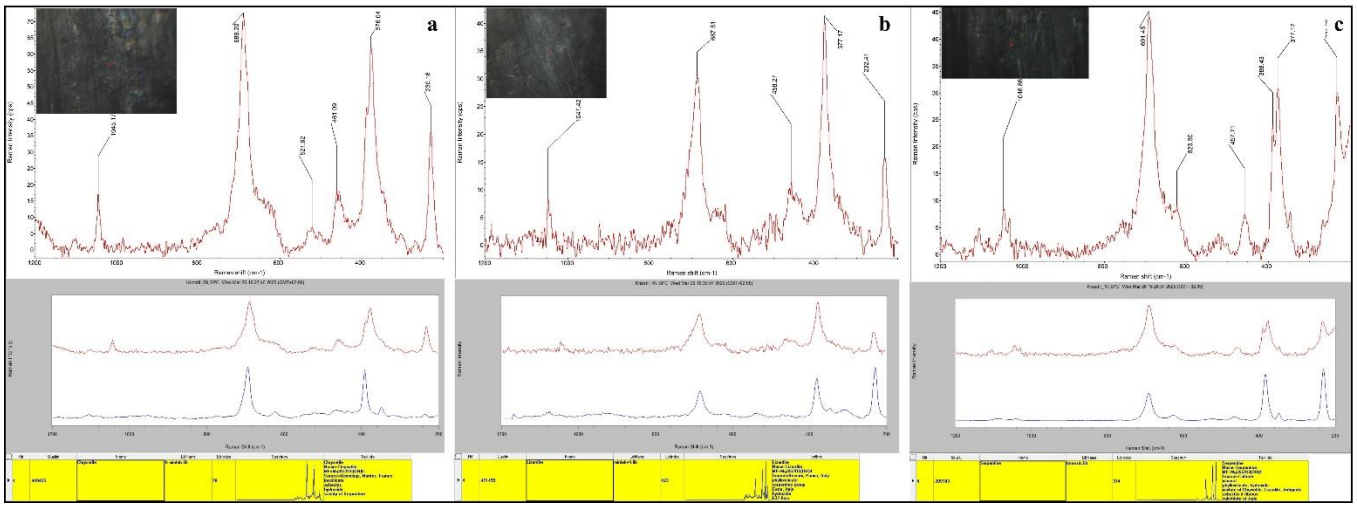


Şekil 3. (a), (b) Serpantin örneklerinin binoküler mikroskop görünümü; (c) (d) Serpantin örneklerinin polarizan mikroskop görüntüsü, kısaltma (ser): serpantn

(Şekil 4a–c). Örneğin, 686 cm^{-1}, 521 cm^{-1}, 376 cm^{-1} ve 230 cm^{-1} bantları krizotilin ayırt edici Raman pikleri olarak yorumlanmaktadır [17-18]. Şekil 4a'daki örnekte krizotil mineraline ait karakteristik bantlar net şekilde gözlenmiştir. Şekil 4b'de lizardit ile ilişkili 687, 458 ve 377 cm^{-1} civarındaki bantlar belirgin olup, bazı spektrumlarda zayıf serpantin spektral izleri de tespit edilmiştir. Şekil 4c'de ise hem krizotil hem lizardit hem de serpantin genel yapısı spektral eşleşmelerle doğrulanmıştır.

Şekil 5'te sunulan FTIR spektrumu, 3682 cm^{-1} bölgesindeki güçlü absorpsiyon piki ile serpantin grubuna ait OH titreşimlerinin varlığını göstermektedir. Bu zirve özellikle krizotil ve antigoritin tanımlanmasında önemli bir göstergedir [19-20]. Ayrıca 943 cm^{-1} ve 602 cm^{-1}'deki absorpsiyon bantları, Si–O–Mg ve Si–O–Si gerilme titreşimlerine karşılık gelmekte olup tipik serpantin spektrumu ile uyumludur. Bu veriler, Raman spektroskopisi ile elde edilen bulguları destekler niteliktedir.

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri, analiz edilen örneklerde lifsi yapının baskın olduğunu ve krizotil liflerinin genellikle paralel dizilimli olarak geliştiğini göstermektedir (Şekil 6a–d). a, b ve c görsellerinde liflerin çoğu, görüntü alanının dışına taşacak şekilde uzamaktadır; d görselinde ise mikron altı düzeyde daha ince fibriller belirlenmiştir. Görsellerde kullanılan ölçek çubukları 200–5 µm aralığında değişse de liflerin bazı örneklerde bu değerlerin üzerinde uzunluklara sahip olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle lif boyutlarının belirli bir aralıkta sınırlandırılması yerine, maksimum uzunlukların tam olarak ölçülemediği, ancak genel olarak yüksek boy/en oranına sahip liflerin gözlenmiştir. Liflerin yüzey morfolojisi düzgün olup, bazı yerlerde ince parçalanma izleri mevcuttur. EDS analizlerinde Mg, Si ve düşük miktarda Fe öne çıkmaktadır; bu dağılım, krizotilin tipik kimyasal yapısı olan $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ ile uyumludur [21-22].



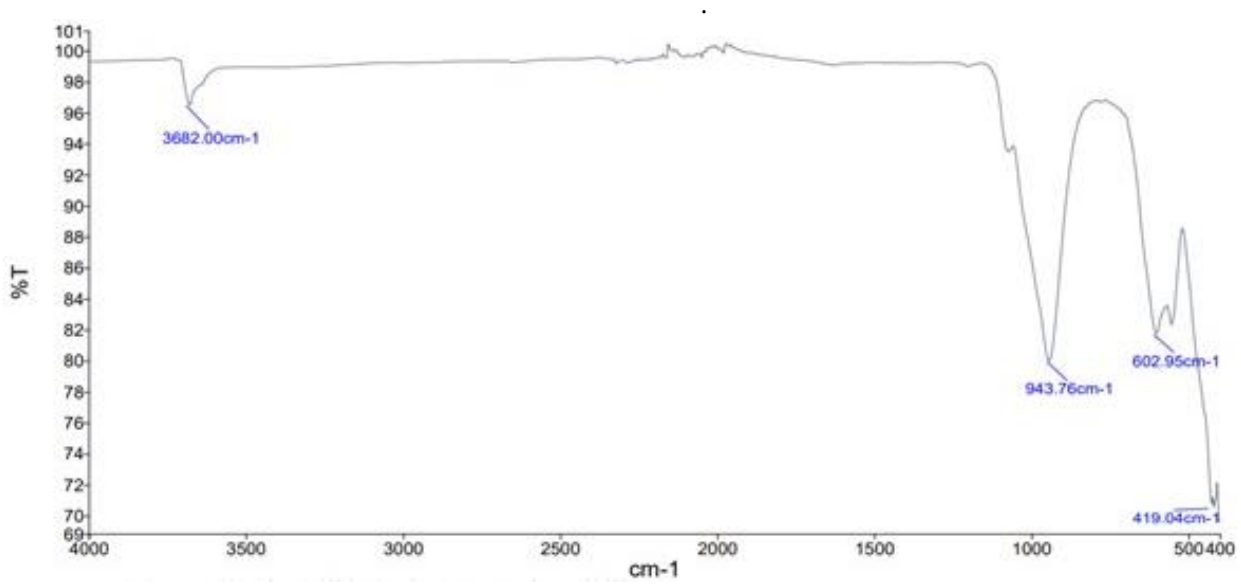
Şekil 4. Temsili Raman spektroskopi sonuçları. (a) Krizotil mineraline ait belirgin Raman bantları: 686, 521, 376 ve 230 cm^{-1}. (b) Lizartit minerali ile uyumlu 687, 458 ve 377 cm^{-1} bölgelerinde spektral yoğunluklar gözlenmektedir. (c) Üçüncü örnekte hem krizotil hem lizartit hem de genel serpantin mineralizasyonuna ait karma spektrumlar tanımlanmıştır

XRF analiz sonuçları Tablo 1'de özetlenmiştir. Tüm örneklerde MgO oranları %35.34–39.21 aralığında değişmekte olup, bu değerler serpantinleşmiş ultramafik kayaçların magnezyumca zengin karakterini yansıtmaktadır. Bu oranlar, ideal krizotil mineralindeki teorik MgO içeriği (%43.63 MgO) ile karşılaştırıldığında daha düşüktür; bu durum analizlerin tek bir minerale değil, tüm kayaç matrisine (çoğunlukla serpantinit ve harzburgit) ait bileşimi yansıtmasından kaynaklanmaktadır. Benzer şekilde SiO_2 oranları da %35.34–40.52 aralığındadır ve ultramafik kökenli silikat bileşenlerinin varlığını göstermektedir [23].

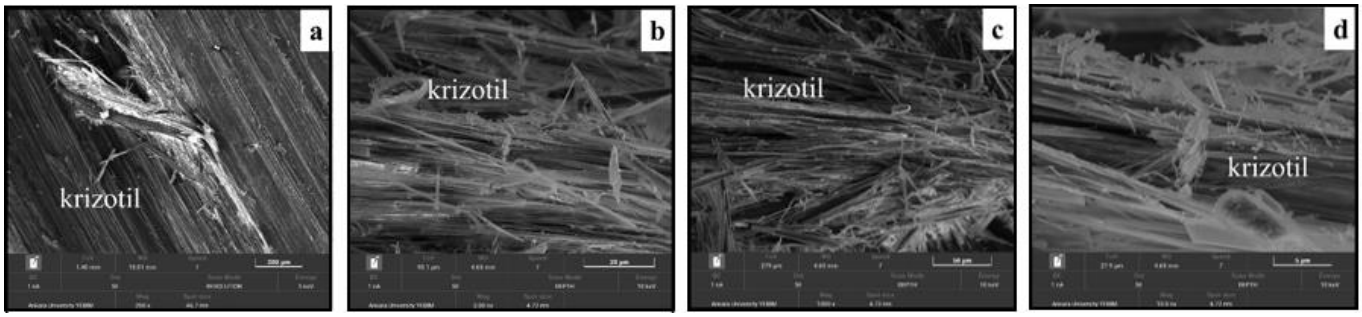
Fe_2O_3 içerikleri %6.39–7.31 arasında değişmekte olup, bu durum serpentinizasyon sürecinde primer mineraller olan olivin ve piroksenin bozunmasıyla sisteme katılan demir miktarını yansıtmaktadır. Bununla birlikte, bu demirin bir kısmı amorf demir oksit/hidroksit fazlarında veya ikincil minerallerde (örneğin manyetit) bulunuyor olabilir.

Ni konsantrasyonları ise 1186–1588 ppm aralığındadır. Bu değerler, tipik olarak olivin minerallerinde tutulan nikelin serpantinleşme sırasında açığa çıkmasıyla açıklanabilir. Bununla birlikte, ofiyolitik birimlerin derin kesimlerinde millerit (NiS) gibi sülfür minerallerinin de bulunabileceği göz önünde bulundurulmalı ve bu elementin kaynağına katkıda bulunabileceği düşünülmelidir. Bu nedenle, tespit edilen Ni içerikleri yalnızca olivin kökenli değil, aynı zamanda potansiyel ikincil sülfür fazlarıyla da ilişkili olabilir [23].

Sr, Cr ve Co gibi iz element içerikleri de ofiyolitik kayaçlarla uyumludur. Özellikle Cr_2O_3 değerlerinin %0,21–0.36 arasında olması, krom açısından zengin ultramafik kaynaklara işaret etmektedir [24]



Şekil 5. FTIR (Fourier Transform Infrared) spektroskopi sonucu. Serpantin grubunun tanımlanmasında kullanılan spektrumda; 3682 cm^{-1}'deki güçlü absorpsiyon bandı OH bağlarının varlığını işaret etmekte olup, bu zirve özellikle krizotil ve antigoritin tanımlanmasında ayırt edici niteliktedir. Ayrıca 943 ve 602 cm^{-1}'deki pikler Si–O–Mg ve Si–O–Si bağlarına karşılık gelmektedir. 419 cm^{-1} civarındaki düşük dalga sayılı pik, magnezyum silikat yapıların deformasyon modlarıyla ilişkilendirilir. Bu sonuçlar, Raman analizlerini destekler niteliktedir.



Şekil 6. Krizotil liflerinin SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüleri. (a) Düşük büyütmede (200×), uzunluğu 200 µm'yi aşan liflerin paralel dizilimli olarak yüzey boyunca geliştiği gözlenmektedir. (b) 3000× büyütmede, krizotil liflerinin tipik sarmal ve ince yapıları detaylı şekilde belirlenmiştir. (c) 1000× büyütmede, liflerin yüzeyde birbirine sıkıca bağlı ve doğrusal yapıda olduğu görülmektedir. (d) 10.000× büyütmede, en ince krizotil liflerinin boyutsal morfolojisi ortaya konmuş olup, yüzeydeki bazı liflerin uçlarının bölünmüş ve dallanmış olduğu dikkat çekmektedir.

Tablo 1. Arızlı (Afyon-Şuhut) bölgesindeki serpantinleşmiş ofiyolitik kayaç örneklerine ait XRF analiz sonuçları.

ÖRNEK		AS-1	AS-2	AS-3	AS-4	AS-5	AS-6
Na_2O	%	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.02	<0.03
MgO	%	39.21	38.13	38.67	35.34	37.01	36.17
Al_2O_3	%	0.30	0.30	0.30	0.24	0.27	0.26
SiO_2	%	40.52	39.63	40.08	35.34	37.71	36.52
P_2O_5	%	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
K_2O	%	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
CaO	%	0.82	1.93	1.38	5.65	3.51	4.58
TiO_2	%	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
MnO	%	0.10	0.10	0.10	0.14	0.12	0.13
Fe_2O_3	%	6.39	7.18	6.79	7.31	7.05	7.18
Cr_2O_3	%	0.21	0.28	0.25	0.36	0.30	0.33
SO_3	%	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02
Cl	%	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
LOI	%	12.23	12.23	12.23	15.37	13.80	14.59
Sc	ppm	10.00	7.00	16.00	11.00	11.33	12.78
V	ppm	26.00	24.00	49.00	33.00	35.33	39.11
Co	ppm	117.00	87.00	88.00	97.33	90.78	92.04
Ni	ppm	1588.00	1186.00	1227.00	1333.67	1248.89	1269.85
Cu	ppm	4.00	2.00	2.00	2.67	2.22	2.30
Zn	ppm	23.00	21.00	21.00	21.67	21.22	21.30
As	ppm	16.00	14.00	14.00	14.67	14.22	14.30
Sr	ppm	103.00	15.00	17.00	45.00	25.67	29.22
Zr	ppm	14.00	14.00	13.00	13.67	13.56	13.41
Nb	ppm	2.00	1.00	2.00	1.67	1.56	1.74
Mo	ppm	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Ba	ppm	18.00	14.00	13.00	15.00	14.00	14.00
Pb	ppm	<1	<1	<1	<1	<1	<1

4 Tartışma

Bu çalışmada Arızlı (Afyon-Şuhut) bölgesindeki krizotil içeren serpantin kayaçları çok yönlü olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular hem mineralojik hem de jeokimyasal açıdan literatürle tutarlıdır.

SEM-EDS, Raman ve FTIR gibi analitik tekniklerin birlikte kullanılması, krizotil tipi minerallerin tanımlanmasında etkin bir yaklaşımdır [25]. Şimşek vd. [26] benzer şekilde çoklu analiz yöntemlerini kullanarak farklı kültürel materyallerde detaylı karakterizasyon sağlamıştır. Arızlı'daki örneklerde de bu çoklu analiz yaklaşımı, krizotil ile lizartit ve antigoritin ayırt edilmesini kolaylaştırmıştır.

Raman analizlerinde belirlenen 686 ve 521 cm^{-1} gibi bantlar, tipik krizotil titreşimleriyle örtüşmektedir [17-18]. Ayrıca FTIR sonuçlarındaki 3682 cm^{-1} bandı, serpantin grubunun OH bağlarını göstermekte olup krizotil varlığını desteklemektedir [19]. Kim vd. [27] çalışmalarında bu titreşimlerin, krizotilin ısıya karşı davranışlarını da yansıttığını belirtmektedir.

SEM görüntülerinde belirgin lifsi yapıların varlığı, serpantin minerali olan krizotilin morfolojik tanısını pekiştirmiştir [21]. Özellikle 10.000× büyütmede gözlenen lif uzamaları ve dallanmaları, Arızlı'daki oluşumların doğrudan serpantinleşme süreçleriyle ilişkili olduğunu düşündürmektedir. Bu gözlemler Yada [22] ve Langer [5] tarafından yapılan klasik tanımlamalarla da uyumludur.

XRF sonuçları krizotil açısından belirleyici olan yüksek MgO ve SiO_2 değerlerini ortaya koymuştur. Ni ve Cr gibi elementlerin belirgin varlığı, olivin ve diğer ultramafik bileşenlerin alterasyonuyla ilişkili olarak açıklanabilir [23-24]. Bu kimyasal bileşim, Sivas ve Tekirova ofiyolitlerinde daha önce bildirilen serpantin türleriyle karşılaştırıldığında benzer özellikler göstermektedir [13, 28].

Krizotil, literatürde en yaygın kullanılan serpantin tipi olarak tanımlanmakta ve sanayide hala sınırlı da olsa kullanılmaktadır. Ancak sağlık riskleri nedeniyle birçok ülkede yasaklanmıştır [29-30]. Bloise vd. [31] doğal olarak oluşan krizotil içeren kayaçların kesilmesi ve işlenmesi sırasında liflerin havaya karışabileceğini vurgulamıştır. Bu

nedenle Arızlı bölgesindeki doğal oluşumların da çevresel açıdan değerlendirilmesi gerekir.

Sonuç olarak, Arızlı ofiyolitik melanjındaki krizotil mineralizasyonu, Raman, FTIR, SEM-EDS ve XRF verileri ile değerlendirildiğinde, tanımlanabilir, çevresel açıdan dikkat gerektiren bir yapı sunmaktadır. Bu tür çalışmalar, doğal krizotilin yayılım alanlarını belirlemek ve riskleri önceden yönetebilmek açısından önemlidir [32].

Arızlı bölgesindeki krizotil oluşumu, Türkiye'nin farklı bölgelerinde belgelenmiş diğer ofiyolitik serpantin yataklarıyla benzerlik göstermektedir. Örneğin, Sivas çevresindeki ofiyolitik birimlerde, benzer şekilde lifsi serpantin mineralleri ve yüksek MgO–SiO_2 içerikleri rapor edilmiştir [13]. Tekirova (Antalya) ofiyolitlerinde de antigorit ve krizotil ayrımı, FTIR ve XRD verileriyle desteklenmiş, bu birimlerdeki mineral paragenesi Arızlı ile örtüşmüştür [28].

Karaçam (Eskişehir) yöresindeki altere ultramafik kayaçlarda da krizotil benzeri lifli yapılar belirlenmiş ve bu oluşumlar serpantinleşme derecesiyle ilişkilendirilmiştir [14]. Jeokimyasal olarak bu yataklarda da MgO ve Cr_2O_3 içeriklerinin yüksekliği dikkat çekmiştir. Arızlı'daki veriler bu örneklerle karşılaştırıldığında, serpantinleşme kaynaklı krizotil oluşumlarının Türkiye genelinde benzer tektonik ortamlarda geliştiği söylenebilir.

Doğal asbestin (NOA – Naturally Occurring Asbestos) bulunduğu alanlarda tozuma, yerleşim alanlarına yakınlık ve yol yapım çalışmaları gibi faktörler önemli çevresel riskler yaratmaktadır [31]. Arızlı'da belirlenen krizotil liflerinin boyutları, WHO kriterlerine göre solunabilir asbest sınıfına girmektedir. Bu durum kontrolsüz kazı veya inşaat çalışmalarında potansiyel tehlike oluşturabilir.

Serpantin lifleri, özellikle havayla taşınabilir formda olduklarında mezotelyoma ve akciğer hastalıklarına yol açabilmektedir [29]. Bu bağlamda, Arızlı gibi doğal krizotil içeren alanlarda, sağlık risk değerlendirmesinin yanı sıra mühendislik önlemleri de planlanmalıdır. Marzini vd. [32], hiperspektral görüntüleme yöntemleriyle yüzeydeki lifli mineral dağılımını haritalayarak bu tür risk alanlarının yönetimine katkı sağlamıştır.

Bu çalışmanın önerdiği yöntem seti (SEM–EDS, Raman, FTIR, XRF) çevresel mineralojide kullanılabilecek güçlü bir araçtır. Hem jeolojik hem de çevresel planlama süreçlerinde bu yaklaşım yaygınlaştırılmalıdır [33].

Bu çalışmada tespit edilen krizotil, lifsi morfolojisiyle diğer serpantin minerallerinden (lizardit, antigorit) ayrılmaktadır. SEM görüntülerinde, tipik olarak damar duvarlarına dik uzanan ve genellikle damar genişliğini kapsayacak uzunlukta gelişen ince fibril kümeleri gözlenmiştir. Bu yapı, Atkinson vd. [34] tarafından tanımlanan klasik "çapraz lifli" krizotil damar oluşumları ile uyumludur. Liflerin yüksek boy/en oranı, kıvrımlı spiral şekli ve paralel yönelimi, bu minerali plaka formunda kristallenen lizardit ve daha masif-dikensel yapıdaki antigoritten ayırmaktadır. Ayrıca, krizotile özgü Raman bantları (686, 521, 376 cm^{-1}) ve FTIR spektral zirveleri (özellikle 3682 cm^{-1} OH bağı) ile kimlik doğrulaması yapılmış, bu yönüyle hem morfolojik hem de spektroskopik olarak ayrımı sağlanmıştır.

5 Sonuçlar

Saha gözlemleri, polarizan mikroskop görüntüleri ve SEM analizleri, serpantin grubuna ait minerallerin hem elek dokulu hem de lifsi morfolojide geliştiğini ortaya koymuştur. Raman analizlerinde krizotil, lizardit ve serpantin minerallerine özgü bantların tespiti; FTIR verilerinde ise karakteristik OH-gerilme titreşimlerinin gözlemlenmesi, lifsi yapının kristal yapısı ile uyumlu olduğunu doğrulamıştır. XRF analizleri, yüksek MgO (%38–42) ve SiO_2 (%39–43) içerikleriyle serpantinleşmiş ultramafik kökenli bir mineralizasyonun göstergesi olmuştur. Ayrıca Ni, Cr ve Fe içerikleri, bu birimlerin olivin ve piroksen gibi primer minerallerden türediğini desteklemektedir.

Elde edilen veriler, Arızlı'daki krizotil oluşumunun, Türkiye'nin diğer ofiyolitik sahalarında (örneğin Sivas, Tekirova, Karaçam) görülen serpantinler ile jeokimyasal ve mineralojik açıdan büyük benzerlikler taşıdığını göstermektedir. Bu yönüyle Arızlı sahası, bölgesel serpantinleşme süreçlerinin ve krizotil oluşum mekanizmalarının anlaşılmasında önemli bir örnek teşkil etmektedir.

Öneriler:

- Arızlı bölgesinde belirlenen krizotil mineralizasyonunun sağlık ve çevre açısından risk taşıyabileceği dikkate alınarak, bu sahada yapılacak kazı, yol yapımı ve inşaat faaliyetlerinde mutlaka serpantin güvenliği standartlarına uyulmalıdır.
- Geniş çaplı yüzey haritalamaları ve hiperspektral görüntüleme çalışmaları ile bölgedeki krizotil yayılım alanı detaylandırılmalı, risk haritaları oluşturulmalıdır.
- Bu çalışmada kullanılan Raman–FTIR–SEM-EDS–XRF entegrasyonu, benzer jeolojik ortamlarda serpantinin tanımlanmasında standartlaştırılabilir ve çevresel mineralojide yaygınlaştırılmalıdır.
- Bölgedeki mineralojik süreçlerin daha iyi anlaşılması için ileri düzey kristalografi, termal ayrışım testleri ve izotopik analizler gibi tamamlayıcı çalışmalar önerilmektedir.

Sonuç olarak, Arızlı ofiyolitik melanjında belirlenen krizotil oluşumu hem akademik araştırmalar hem de kamu sağlığı açısından önemli bulgular sunmaktadır. Bu tür doğal krizotil içeren alanların bilimsel yöntemlerle tespit edilmesi ve düzenli izlenmesi, sürdürülebilir çevre yönetimi için gereklidir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %8

Kaynaklar

[1] R. L. Virta, Asbestos: Geology, mineralogy, mining, and uses. US Department of the Interior, US Geological Survey, Open File Report 02-149, 2002.

[2] S. Singh, A. Das, P. Sharma, A. K. Sudheer, M. Gaddam and R. Ranjan, Spatiotemporal variations, sources, pollution status and health risk assessment of dissolved trace elements in a major Arabian Sea draining river: insights from multivariate statistical and

machine learning approaches. Environmental Geochemistry and Health, 46(4), 130, 2024. https://doi.org/10.1007/s10653-024-01885-9.

[3] T. A. Sporn, Mineralogy of asbestos. Malignant Mesothelioma, 1–11, 2011. https://doi.org/10.1007/978-3-642-10862-4_1.

[4] A. Bloise, D. Miriello, L. Gaggero, G. Lanzafame and R. Punturo, Multi-analytical approach for asbestos minerals and their non-asbestiform analogues: Inferences from host rock textural constraints. Fibers, 7(5), 42, 2019. https://doi.org/10.3390/fib7050042.

[5] A. M. Langer, Identification and enumeration of asbestos fibers in the mining environment: Mission and modification to the Federal Asbestos Standard. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 52(1), S207–S217, 2008. https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2008.01.007.

[6] S. Nasir, K. N. Khankahdani and A. R. Nasir, Geochemical and petrological characterization of listwaenite from Oman and Iran ophiolites: implications for hydrothermal carbonation and silicification alteration processes. Arabian Journal of Geosciences, 18(4), 98, 2025. https://doi.org/10.1007/s12517-025-12244-y.

[7] C. Ricchiuti, D. Pereira, R. Punturo, E. Giorno, D. Miriello and A. Bloise, Hazardous elements in asbestos tremolite from the Basilicata region, southern Italy: A first step. Fibers, 9(8), 47, 2021. https://doi.org/10.3390/fib9080047.

[8] G. M. Militello, A. Bloise, L. Gaggero, G. Lanzafame and R. Punturo, Multi-analytical approach for asbestos minerals and their non-asbestiform analogues: Inferences from host rock textural constraints. Fibers, 7(5), 42, 2019. https://doi.org/10.3390/fib7050042.

[9] A. Şaşmaz, A. D. Kılıç and N. Konakçı, Chemical and thermal changes in $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ polymorph minerals and importance as an industrial material. Applied Sciences, 14(22), 2024. https://doi.org/10.3390/app142210298.

[10] R. K. Upadhyay, Non-metallic minerals and their deposits. In: Geology and Mineral Resources, Springer Nature Singapore, pp. 563–652, 2025. https://doi.org/10.1007/978-981-96-0598-9_9.

[11] Y. Dilek and H. Furnes, Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere. Geological Society of America Bulletin, 123(5–6), 387–411, 2011. https://doi.org/10.1130/B30446.1.

[12] O. Parlak, T. Rızaoğlu, U. Bağcı, F. Karaoğlan and V. Höck, Tectonic significance of the geochemistry and petrology of ophiolites along the İzmir-Ankara-Erzincan Suture Zone in northeastern Anatolia. Geological Society London Special Publications, 372, 5–105, 2013. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.08.002.

[13] Z. Başıbüyük, H. Yalçın and Ö. Bozkaya, Sivas bölgesi ofiyolitleri ile ilişkili asbest yataklarının mineralojisi. 14. Ulusal Kil Sempozyumu, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 2009.

[14] B. Serin, Karaçam (Sivrihisar, Eskişehir) ve çevresindeki demir, nikel zenginleşmelerinin mineralojisi, petrografisi ve jeokimyası. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, 2020.

[15] J. S. Schapira, R. Bolhar, S. Master and A. H. Wilson, Mineralogical, petrological and geochemical characterisation of chrysotile, amosite and crocidolite asbestos mine waste from southern Africa in context of risk assessment and rehabilitation. Minerals, 13(10), 1352, 2023. https://doi.org/10.3390/min13101352.

[16] Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA), 1:25.000 ölçekli Afyon L25 B4 paftası jeoloji haritası. MTA Yayınları, Ankara, 2023.

[17] V. Hizhnyakov ve I. Tehver, Resonant light scattering and luminescence in multimode vibronic systems: time-dependent representation. Journal of Raman Spectroscopy, 32 (6–7), 591–597, 2001. https://doi.org/10.1002/jrs.714.

[18] C. Rinaudo, D. Gastaldi ve E. Belluso, Characterization of chrysotile, antigorite and lizardite by FT-Raman spectroscopy. The Canadian Mineralogist, 41 (4), 883–890, 2003. https://doi.org/10.2113/gscanmin.41.4.883.

[19] V. C. Farmer (Ed.), The infrared spectra of minerals, Cilt 4, s. 51–67. Mineralogical Society, London, 1974.

[20] A. Cavallo ve B. Rimoldi, Chrysotile asbestos in serpentinite quarries: a case study in Valmalenco, Central Alps, Northern Italy. Environmental Science: Processes & Impacts, 15 (7), 1341–1350, 2013. https://doi.org/10.1039/C3EM00193H.

[21] A. Brostrøm, H. Harboe, A. S. Fonseca, M. Frederiksen, P. Kines, W. Bührmann, … ve K. A. Jensen, Asbestos fiber levels from remediation work. Journal of Hazardous Materials Advances, 17, 100552, 2025. https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100552.

[22] K. Yada, Study of microstructure of chrysotile asbestos by high-resolution electron microscopy. Foundations of Crystallography, 27 (6), 659–664, 1971. https://doi.org/10.1107/S0567739471001402.

[23] L. W. Zelazny, P. J. Thomas ve C. L. Lawrence, Pyrophyllite–Talc minerals. In: J. B. Dixon ve D. G. Schulze (Eds.), Soil Mineralogy with Environmental Applications, Cilt 7, s. 415–430. Soil Science Society of America, Madison, 2002. https://doi.org/10.2136/sssabookser7.c13.

[24] L. Butjosa, A. Cambeses, J. A. Proenza, S. Agostini, M. Iturralde-Vinent, L. Bernal-Rodríguez ve A. Garcia-Casco, Relict abyssal mantle in a Caribbean forearc ophiolite (Villa Clara, central Cuba): Petrogenetic and geodynamic implications. International Geology Review, 66 (1), 196–227, 2024. https://doi.org/10.1080/00206814.2023.2179229.

[25] G. Wille, D. Lahondère, and W. Kloppmann, Coupled SEM-EDS-RAMAN: A complimentary approach for characterisation–Application to geomaterials. In *IOP* Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 1324, No. 1, p. 012012). IOP Publishing, 2025. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1324/1/012012.

[26] O. Şimşek, F. Özbaş, E. Kaygisiz, G. Yaşayan, and G. Ö. Ildız, Multianalytical characterization of Byzantine wall paintings by SEM-EDX, µ-XRD, Raman and FTIR techniques. Turkish Journal of Earth Sciences, 34(2), 246–262, 2025. https://doi.org/10.55730/1300-0985.1957.

[27] C. Kim, Y. Kim, and Y. Roh, Thermal decomposition and phase transformation of chrysotile in asbestos-containing waste. Minerals, 15(4), 344, 2025. https://doi.org/10.3390/min15040344.

[28] H. Yalçın, Ö. Bozkaya, ve C. Yılmaz, Tekirova (Antalya) Ofiyolit Napı kayaçlarının alterasyon mineralojisi ve jeokimyası. Türkiye Jeoloji Bülteni, 58(1), 63–89, 2015.

[29] J. R. Petriglieri, D. Bersani, C. Laporte-Magoni, M. Tribaudino, A. Cavallo, E. Salvioli-Mariani, and F. Turci, Portable Raman spectrometer for in situ analysis of asbestos and fibrous minerals. Applied Sciences, 11(1), 287, 2020. https://doi.org/10.3390/app11010287.

[30] C. P. Girotto, de S. D. Campos, and É. A. de Campos, Chrysotile asbestos treated with phosphoric acid as an adsorbent for ammonia nitrogen. Heliyon, 6(2), e03337, 2020. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03397.

[31] A. Bloise, F. Parisi, M. F. La Russa, C. Apollaro, N. Godbert, I. Aiello, ... and D. Pereira, Evaluation of asbestos dispersion during laser ablation of rocks containing naturally occurring asbestos (NOA). *Heliyon*, 10(21), e18652, 2024. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39624.

[32] L. Marzini, I. Osticioli, D. Ciofini, J. Agresti, S. Bellagamba, F. Paglietti, ... & S. Siano, Identification, mapping, and quantification of asbestos minerals in ACM and NOA using NIR-SWIR hyperspectral scan imaging: Preliminary study. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 125893, 2025. https://doi.org/10.1016/j.saa.2025.125893.

[33] A. A. Kamnev, Recent developments in analytical molecular and biomolecular spectroscopy. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 126164, 2025 https://doi.org/10.1016/j.saa.2025.126164.

[34] A. W. Atkinson, R. B. Gettins, A. L. Rickards, Estimation of fibril lengths in chrysotile asbestos fibres. Nature, 1970, 226(5249), 937–938. https://doi.org/10.1038/226937a0.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 1035-1048

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Investigation of the potential of hull-less barley and hull-less oat to improve the nutritional and technological quality of bread

Kavuzsuz arpa ve kavuzsuz yulafın ekmeğin besinsel ve teknolojik kalitesini iyileştirme potansiyelin araştırılması

Yaşar Karaduman[1,*], Gözde Yüksel Yıldırım[2], Arzu Akın[3]

[1,2] *Eskişehir Osmangazi University, Faculty of Agriculture, Food Engineering Department, 26160, Eskişehir, Türkiye*
[3] *Eskişehir Transitional Zone Agricultural Research Institute, Quality and Technology Department, 26005, Eskişehir, Türkiye*

Abstract

In this study, the effects of enriching hull-less barley and oat whole grain flours (WGFs) on the quality properties of bread were investigated. Bread flour was incorporated at 25, 50, and 75% by both WGFs. WGFs' incorporation negatively affected gluten quality and bread volume. However, β-glucan content and protein content of the breads increased. Hull-less barley breads had over 3.0% β-glucan in the 50% substitution rate. The total phenolic content and total antioxidant activity of the hull-less barley breads were found also higher (179.8 mg GAE/100g and 346.9 µmol TE/g). In the breads, the protein content was increased from 10.38% to 16.36%. The iron, potassium, and zinc contents of hull-less barley breads were found to be high. The gluten network of hull-less oat breads was developed at the 50% substitution rate. The sensory scores of breads met the acceptable threshold of 5.0 at a 50% replacement rate for both WGFs.

Keywords: Hull-less oat, Hull-less barley, β-glucan, Bread, Cereals, Nutrition

Öz

Bu çalışmada, kavuzsuz arpa ve yulaf tam tane unu (TTU) ile zenginleştirmenin ekmeğin kalite özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ekmeklik una %25, %50, ve %75 oranlarında kavuzsuz arpa ve yulaf TTU ikame edilmiştir. TTU ikamesi gluten kalitesini ve ekmek hacmini olumsuz etkilemiştir. Ancak ekmeklerin β-glukan ve protein miktarları artmıştır. Kavuzsuz arpa ekmekleri %50 ikame oranında %3,0'ın üzerinde β-glukan miktarına sahiptir. Kavuzsuz arpa ekmeklerinin toplam fenolik madde ve toplam antioksidan aktivite değerleri daha yüksek bulunmuştur (179.8 mg GAE/100g ve 346.9 µmol TE/g). Ekmeklerde protein miktarı %10.38'den %16.36'ya artmıştır. Kavuzsuz arpa ekmeklerinin demir, potasyum ve çinko miktarları daha yüksektir. Kavuzsuz yulaf ekmeklerinin gluten ağı %50 ikame oranında daha iyi gelişmiştir. %50 TTU ikameli ekmeklerin duyusal puanları kabul edilebilir sınır olan 5.0'e yakın veya üzerindedir.

Anahtar kelimeler: Kavuzsuz yulaf, Kavuzsuz arpa, β-glukan, Ekmek, Tahıllar, Beslenme

1 Introduction

Cereals are an important source of carbohydrates, protein, minerals, vitamins, and dietary fibers [1] and health-beneficial bioactive compounds [2]. Among the various types of cereals, whole grains stand out due to their higher nutritional value and potential health benefits [3]. Regular consumption of whole grains has been linked to a reduced risk of chronic diseases, such as heart disease and diabetes, making them a valuable addition to a balanced, healthy diet [4]. Cereals like hull-less barley and hull-less oat WGFs have been emphasized as part of a health-conscious lifestyle, as they provide essential nutrients while also promoting digestive health. Incorporating these grains into meals can enhance overall well-being and support long-term health goals [5]. The separation of hull parts of their grains during harvest increases the nutritional value of the grain [6], provides ease of grinding, and prevents the formation of undesirable structure in the end product [7].

Hull-less barley WGF is richer in nutritional components such as β-glucan, limiting aminoacids, vitamins, phenolic and flavonoid compounds (proanthocyanidins), starch, and total dietary fiber [8]. Hull-less oats also have high energy value and are a good source of protein, essential aminoacides, starch, fat, β-glucan, and bioactive components [9] and significant amounts of various antioxidants such as tocopherols and tocotrienols (tocols), phenolic acids, and avenanthramides [10]. In addition to their abundance of other nutrients, both grains are particularly high in β-glucan, which is very beneficial to human health [2]. The United States Food and Drug Administration (FDA) has authorized a health claim indicating that the intake of a minimum of 0.75 grams per serving or 3 grams per day of β-glucan is beneficial [11]. The European Food Safety Agency (EFSA) has approved the use of health claims to reduce blood sugar, increase the intestinal viscosity, lower the glycemic index, reduce the risk of colon cancer, and balance the LDL-cholesterol of β-glucans from oats and barley [12]. Bread is an essential food that is enjoyed all over the world and represents many different cultural traditions in its history and variation [13].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: yasarkaraduman1973@gmail.com (Y. Karaduman)
Geliş / Received: 06.05.2025 Kabul / Accepted: 31.05.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1693437

Researchers emphasize the urgent need to enrich bread, primarily made from refined flour, with alternative grain components [14]. Hull-less barley and hull-less oat grains are valuable cereals that increase the nutritious content of bread, such as β-glucan.

The aim of the study was to assess the potential benefits of using hull-less barley and oat whole grain flours (WGFs) in relation to the final characteristics and nutritional content of white wheat bread. For the purpose of this, hull-less barley and oat WGFs were added to bread flour at 25%, 50%, and 75% levels. The resulting breads' β-glucan contents, physicochemical and dough rheological properties were evaluated.

2 Material ve methods

2.1 Materials

Hull-less oat (*cv*. Yalın, *Avena sativa* L.) and hull-less barley (*cv*. Yazır, *Hordeum vulgare* L.) kernels were provided by Bahri Dagdas International Agricultural Research Institute and Field Crops Central Research Institute. A cleaner-separator (Brabender Labofix90 Docking Device, Germany) removed the impurities from hull-less barley and oat grain seeds. The grains were milled to whole grain flours (WGFs) with a particle size of 500 µ with a Retsch ZM200 (Retsch Haan, Germany) mill in the Quality and Technology Laboratory of the Transitional Zone Agricultural Research Institute (TZARI). The characteristics of commercial bread flour provided by a local company were as follows: moisture 13.8/100 g, ash content 0.793/100 g, and protein content 11.35/100 g, (dry matter). Hull-less barley and oat WGFs were incorporated into bread flour at proportions of 25%, 50%, and 75%, and the mixtures were thoroughly homogenized using a dough mixer (Kitchen Aid, model 5KSM45, St. Joseph, MI, USA). The resulting flour blends were sealed in polyethylene packaging and maintained in a cold, dark environment (approximately 10±2 °C) until analytical procedures were performed. All reagents and chemicals utilized were of analytical-grade purity.

2.2 Physicochemical analysis

A Hunter Lab MiniScan XE Plus (Hunter Lab, MiniScan XE Plus, Reston, Virginia, USA) was used to measure the flours' color. By drying in a Daihan Wiseven oven set at 135°C until the weight remained constant, the moisture content was ascertained. The Novasina apparatus (Labmaster-AW manual, Lachen, Switzerland) was used to measure the water activity. The American Association of Cereal Chemists (AACC) Method 08.01 [15] was used for determining the quantity of ash. Protein analyses were carried out using a nitrogen (N) analyzer (LECO FP628) that operated using the Dumas combustion method in following AACC Method 46-30 [15]. The results were provided on dry matter using the N x 5.7 factor. Using a modified AACC method and 100 mL standard test tubes, the macro SDS sedimentation test was performed out [15]. The modified method was used to determine the solvent retention capacity tests using pure water, lactic acid (5% v/v), sucrose (50% w/v), and sodium carbonate (5% w/v) [16]. The antioxidant activity (TAA) was measured using 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH), and absorbance at 517 nm was measured using a SPECTROstar Nano microplate reader (Headquarters BMG Labtec GmbH, Germany). The Trolox calibration chart was developed in order to calculate the antioxidant activity. Total phenolic content (TPC) was colorimetrically measured using the Folin-Ciocalteu technique. The absorbance of the solutions at 765 nm has been measured using a microplate reader. The amount of gallic acid in grams of extract (mg GAE/g) was used to determine the total phenolic content. The calibration equation for gallic acid was provided below.

$$y = 0.007x - 0.0053, R^2 = 0.999$$

According to AACC Method 32-23.01 [15], the Megazyme enzymatic kit (Bray, County Wicklow, Ireland) was used to measure the β-glucan of flour and bread samples.

2.3 Rheological properties

Using the Rapid Flour Control (RFC) method, the Brabender GlutoPeak instrument (Brabender GmbH & Co. KG, Duisburg, Germany) was used to assess the aggregation properties of gluten. The analysis was carried out in 3 minutes at a constant temperature of 34 °C and a mixing speed of 1900 rpm using 9 g of flour sample and 9 g of 0.5 M $CaCl_2$ [17]. Alveo-Link (Chopin Technologies France) was used to evaluate the rheological parameters of the dough using a version of AACC Method 54.30.02 [15]. A 60-g single-blade mixer (Bastak Instruments) was used to prepare the dough for eight minutes, and the derived equation from our previous research [18] was used to determine the amount of water that should be added. After 20 minutes of rest, the dough was subjected to the Alveo-AH test.

2.4 Bread-making and analysis

The modified version of AACC 10-09.01 was used to produce the breads [15]. In Eskişehir, Turkey, we purchased fresh yeast, sugar, and salt from neighborhood markets. Bread-making ingredients: 25 mL of a 2% fresh yeast solution, 100 g of wheat type, 25 mL of a sucrose + NaCl solution (which contained 4% NaCl and 3% sugar), and the water calculated using the developed equation [18]. With 47.0 mL of fresh yeast and salt solutions subtracted, the necessary amount of water was added. A kitchen-type mixer (KitchenAid, 5KSM45, USA) was used to prepare the dough for four minutes at speed 2 (slow mixing). In a fermentation cabinet (Şimşek Lab., Ankara, Turkey), two bulk fermentations were conducted for 30 minutes at 30 °C and 85% relative humidity. The dough was shaped by hand pounding and molding before being placed into the typical Teflon pans. The last fermentation was conducted in the identical conditions for forty-five minutes. The bread was baked in a laboratory-style oven (Şimşek Lab., Ankara, Turkey) at 230 °C for 25 minutes. The breads were then allowed to cool for two hours at ambient temperature (Figure 3). The bread crumb and crust's L* (brightness), a* (+red/-green), and b* (+yellow/-blue) values were measured using a Minolta CR-300 (Konica Minolta, Tokyo, Japan). The color values L*, a*, and b* were noted; each value was the

mean of four measurements taken at different places on the crumb and bread crust. AACC Method 10-05.01 was used to calculate bread volumes based on the replacement of rapeseed [15]. The specific volume of the bread was calculated by dividing its total volume by its corresponding mass. A texture analyzer device (Stable Microsystems, TA.XT Plus, Godalming, Surrey, UK) equipped with Texture Expert Software and following the AACC Method 74.09.01 protocol was employed to perform Texture Profile Analysis (TPA) of the bread samples [15]. For this analysis, 25 mm thick bread slices were compressed twice at 40% of their original height, with a 5-second interval between compressions, using a 36 mm cylindrical probe (P/36) and a 5 kg load cell. The test settings were as follows: At 1.0 mm/s for the pre-test, 2.0 mm/s for the test, and 2.0 mm/s for the post-test, the trigger force was 20 g, and the time was 5 s. Ten milliliters of nitric acid were applied to one gram of dried and ground bread samples that had been weighed into microwave tubes for the mineral analysis. The materials were burnt for 30 minutes at 200 ºC in a microwave system (CEM, Mars 6). The samples were allowed to cool to room temperature before being mixed with 50 milliliters of clean water and subjected to ICP-OES analysis (PerkinElmer, Optima 8000). Scanning electron microscopy (SEM) (JSM-7001F, Tokyo, Japan) was used to investigate the bread crumbs at a magnification of 500×. Fifteen willing panelists, including seven women and eight men in the 20–55 age range who are specialists in food science and technology, conducted the sensory analysis. In an informational letter, the panelists were informed of the study's purpose. In addition to a glass of pure water for mouthwash, the panelists were given bread samples that were coded with random numbers for every sensory session and placed on a plastic plate at 20 °C for evaluation. Taste, color of crust and crumb, pore and crumb structure, chewiness, and appearance were all evaluated using a hedonic scale with a range of 1 to 9 (1 being strongly dislike, 5 being neither like nor dislike, and 9 being extremely like).

2.5 Statistical analysis

Analysis of variance (ANOVA) was used in a two-factor completely randomized design (CRD) to examine the nutritional and technological quality characteristics of bread and flour. Using Tukey's honestly significant difference (HSD), significant differences between means were identified ($p \leq 0.05$). Standard deviations and means are displayed. To conduct statistical studies, JMP 13.0.0 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) was used.

3 Results and Discussion

3.1 β-glucan contents of flours

The β-glucan content of the flours substituted with whole grain flours (WGFs) is given in Table 1. The mean β-glucan content of hull-less barley WGF was higher than that of hull-less oat WGF (3.12% compared to 2.74%). It has been reported that the final β-glucan content of products can be increased by mixing barley WGF [19, 20]. The β-glucan content of wheat flour increased from 0.26% to 6.80% when 100% hull-less barley WGF was incorporated in another study [7]. The percentage of β-glucan increased from 1.44% to 2.83% when 15% hull-less oat flour was substituted for bread flour, and it increased to 3.50% whenever 30% was substituted [21]. The β-glucan content of the hull-less WGFs increased ($p<0.01$) as the replacement rate increased from 0.61% to 5.15%. Hull-less barley WGF had the highest β-glucan content (5.48%). Additionally, the β-glucan content of hull-less oat WGF was high (4.83%). The β-glucan contents in hull-less barley WGF were found to be significantly higher than those in hull-less oat WGF at 75% and 50% replacement rates (4.45% and 3.18%; 3.60% and 2.82%). The β-glucan contents for both WGFs (1.88% and 1.83%) were quite close to each other at the 25% replacement rate (Figure 1a). This indicated that while hull-less barley WGF exhibited a superior β-glucan content, the differences between the two sources became less pronounced at lower replacement rates. Furthermore, these findings suggested that both WGFs could be valuable additions to formulations aimed at enhancing dietary fiber content while maintaining a balance of nutritional benefits. Barley-derived β-glucan has been shown to exert protective effects against colorectal carcinogenesis, promote gastrointestinal health, and enhance the nutritional attributes of bread through modulation of postprandial glycemic response and insulin dynamics [22].

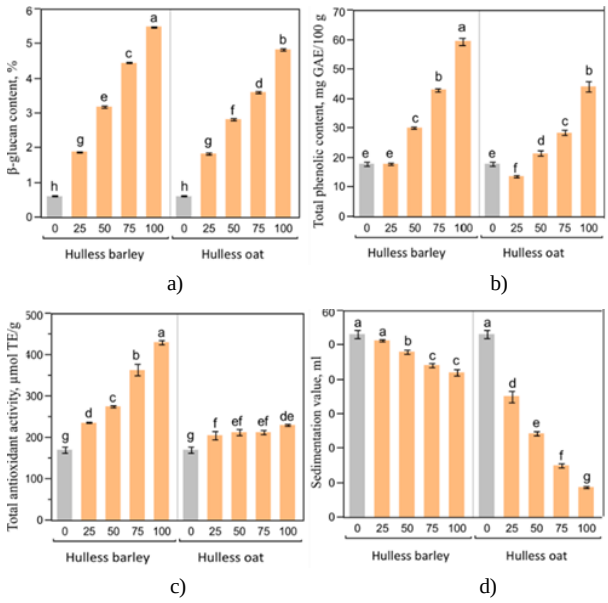


Figure 1. The β-glucan, total phenolic content (TPC), total antioxidant activity (TAA) and sedimentation value of WGFs substituted by hull-less barley and oat. The means marked with different letters are statistically different from each other ($p \leq 0.05$)

3.2 Physicochemical properties of flours

The color properties of the flours substituted by whole grain flours (WGFs) are shown in Table 1. Hull-less barley WGF had a higher L* value (91.19 and 87.94), while hull-less oat WGF exhibited higher a* and b* values (1.35 and 12.77). Hull-less oat grain is rich in carotenoids in

the aleurone layer [23], where carotenoids can reach up to 1.8 µg/g. Lutein is the primary xanthophyll, and zeaxanthin is the secondary xanthophyll found in oat grain [24]. Anthocyanins present in the aleurone layer and pericarp of barley contribute to the blue and purple hues of the grain color [6, 25]. The L* value of the bread flour decreased (indicating a darker color) as the substitution rate of hull-less oats and barley WGF increased, while the a* and b* values rose. Compared to hull-less barley WGF, the mean L* value of hull-less oat WGF was lower (87.94), whereas the a* and b* values were higher (1.35 and 12.77). The reduction in the L* value became more apparent in the flours after 50% substitution with hull-less oat WGF (<85.0). In contrast, hull-less barley substitutes had L* values around 90.0. The a* value of hull-less barley WGF was 1.33 at 25% replacement rates, after which it declined. Conversely, the a* value of hull-less oat consistently increased at every substitution level, reaching approximately three times that of the control bread flour at 50% and 100% replacements (1.80 and 2.06, respectively). The substitution of hull-less barley WGF had no significant effect on b* values; however, the b* value gradually increased, ranging from 11.25 to 15.23 when hull-less oat WGF was included. Depending on the replacement rate, the L* value decreased while the a* and b* values increased. As the replacement rate increases, these changes in color metrics may influence consumer perception and acceptance of the final product. Hull-less barley had a lower mean ash level than hull-less oat-substituted flour (1.298% and 1.419%). The addition of layers of aleurone, embryo, and pericarp—all of which contain significant amounts of mineral compounds—to the substituted flours caused their ash content to rise linearly [26] (Table 1). The range of ash percentages in the substitute flours was 1.024 to 2.203% for oats and 0.933 to 1.966% for barley. All of the substituted flours had water activities and moisture levels below 0.500 and 14.0%, respectively. Despite having a moisture level below 14.0%, hull-less oats had a higher mean (13.36%). Water activity and moisture content in both flours decreased as replacement rates increased. The moisture content of two hulless barley flours with the same particle size and processed in the same mill was 9.84% and 10.68%, but it was likewise higher at 12.98% in refined white flour [27]. The particle size of hull-less barley and oat flours (500 µm) exceeded that of the control flour (<200 µm), and as particle size increased, the surface area diminished. Consequently, larger holes in the structure resulted in a reduction of moisture content, and water activity decreased accordingly. Water is absorbed in the hydrophilic areas of high dietary fiber, particularly β-glucan, found in hull-less barley and oats, or between the interstices of their molecular structure [28]. Water activity is an indicator associated with microbial activities, lipid oxidation, and enzymatic activities. In the study, the low moisture content (<14.0%) and, in relation to moisture, low water activity (<0.70) of flours with the increasing rate of substitution were evaluated positively for microbial and chemical stability [29]. Total phenolic content (TPC), total antioxidant activity (TAA), and protein content of the flours substituted by hull-less barley and oat WGF are given in Table 1. The mean TPC and TAA of hull-less barley flour were found to be higher than that of hull-less oat (33.65 mg GAE/100 g and 294.5 µmol TE/g, $p<0.01$). Hull-less barley WGF had the greatest TPC and TAA, measuring 59.37 mg GAE/100g and 429.8 µmol TE/g, respectively. Hull-less barley grains contain a diverse spectrum of antioxidant compounds, including phenolic acids, flavonoids (such as flavonols, flavones, and flavanones), proanthocyanidins, tannins, lignans, and aminophenolic constituents [8, 19, 30]. Avenanthramides, phenolic acids, tocopherols, and tocotrienols (tocols) are among the many antioxidant groups that are present in considerable proportions in hull-less oat grains [8, 26]. Other important carotenoids found in hull-less barley include zeaxanthin and lutein [30, 31], which have strong antioxidant properties because of their electron-rich chains [10, 32]. When hull-less barley WGF was incorporated, TPC and TAA increased from 17.97 to 59.37 mg GAE/100 g and 235.8 µmol TE/g to 429.8 µmol TE/g, respectively, in the study. Only TPC and TAA values of 44.05 mg GAE/100 g and 229.7 µmol TE/g at 100% replacement were found in hull-less oat WGF-replaced flours. The TAA and TPC values of all replacement ratios of hull-less barley flour were found to be higher than those of hull-less oat flour (Figure 1b, 1c). This indicates that hull-less barley flour may possess superior antioxidant properties compared to hull-less oat flour. Consequently, the potential health benefits associated with consuming products made from hull-less barley could be more pronounced, warranting further investigation into their applications in various food products. In comparison to hull-less barley, the mean protein content of hull-less barley flour was higher (13.95% and 13.50%). Forty percent prolamins (hordein), 10–15% avenines, and 25 percent glutelins are composed of barley protein [3]. The protein content of hull-less barley has been reported to be between 8 and 15%, whereas that of hull-less oat grain varies between 12 and 17% [33]. A 25% substitution of both hull-less WGFs enhanced the control bread flour's protein content by about 2.0%, a 50% increase by 3%, and a 75% increase by 5%. The protein content of all oat and hull-less barley WGFs was comparatively high (about 17.0%). The percentage of protein increased from 10.44% to 17.09% as the replacement rate increased. This increase in protein content not only improves the nutritional profile of the bread but also affects its texture and overall quality.

3.3 Gluten quality-related parameters of flours

The gluten-quality-related properties of the flours substituted by hull-less barley and oat WGFs are given in Table 2. Because of the higher β-glucan and protein contents of hull-less barley WGFs, which retain water in strong hydrophilic regions and gaps in their molecular structures [28], the SRC lactic acid values, related to gluten strength [34], of hull-less barley WGF were found to be significantly higher than those of hull-less oat flour (130.3% and 121.4%). Despite the gluten dilution with the increase in the substitution rate, the SRC lactic acid value increased. SRC tests function properly on refined flour, but when the bran layer from whole grain flour is added,

the efficacy of the test is considerably reduced [35].

Table 1. The physicochemical properties of flours substituted by hull-less barley and oat WGFs[1]

	L*	a*	b*	Moisture content %	Protein content %	β-glucan content %	Ash content %	Water activity (a_w)	Total phenolic content mg GAE/100 g	Antioxidant activity µmol TE/g
Flour type (FT)										
Control	93.03 ± 0.34^{a}	0.62 ± 0.02^{h}	10.59 ± 0.11^{e}	14.20 ± 0.10^{a}	10.44 ± 0.25	0.61 ± 0.03^{h}	0.695 ± 0.020^{i}	0.565 ± 0.02	17.97 ± 1.23^{e}	169.5 ± 12.7^{g}
HB1	89.49 ± 0.34^{e}	1.33 ± 0.05^{c}	10.06 ± 0.30^{f}	12.60 ± 0.44^{d}	12.68 ± 0.17	1.88 ± 0.02^{g}	0.933 ± 0.007^{h}	0.493 ± 0.01	17.97 ± 0.60^{e}	235.8 ± 2.8^{d}
HB2	90.27 ± 0.05^{d}	1.21 ± 0.04^{d}	9.79 ± 0.10^{fg}	11.83 ± 0.06^{e}	13.92 ± 0.12	3.18 ± 0.04^{e}	1.246 ± 0.007^{f}	0.446 ± 0.01	29.98 ± 0.60^{c}	274.3 ± 4.2^{c}
HB3	91.12 ± 0.04^{c}	1.02 ± 0.04^{e}	9.65 ± 0.14^{g}	11.00 ± 0.10^{f}	15.48 ± 0.26	4.45 ± 0.04^{c}	1.652 ± 0.003^{d}	0.427 ± 0.00	42.96 ± 0.92^{b}	363.1 ± 24.5^{b}
HB4	92.05 ± 0.14^{b}	0.86 ± 0.02^{g}	9.91 ± 0.07^{fg}	9.93 ± 0.40^{g}	17.24 ± 0.19	5.48 ± 0.04^{a}	1.966 ± 0.033^{a}	0.382 ± 0.01	59.37 ± 2.29^{a}	429.8 ± 7.7^{a}
HB_{mean}	91.19^{A}	1.01^{B}	10.00^{B}	11.91^{B}	13.95^{A}	3.12^{A}	1.298^{B}	0.463	33.65^{A}	294.5^{A}
HO1	90.22 ± 0.31^{d}	0.95 ± 0.02^{f}	11.25 ± 0.03^{d}	13.83 ± 0.21^{ab}	11.66 ± 0.64	1.83 ± 0.04^{g}	1.024 ± 0.021^{g}	0.509 ± 0.01	13.63 ± 0.82^{f}	204.8 ± 16.6^{f}
HO2	87.72 ± 0.55^{f}	1.32 ± 0.05^{c}	12.53 ± 0.15^{c}	13.57 ± 0.12^{b}	13.51 ± 0.09	2.82 ± 0.07^{f}	1.403 ± 0.021^{e}	0.446 ± 0.01	21.51 ± 1.59^{d}	212.8 ± 11.6^{ef}
HO3	85.03 ± 0.60^{g}	1.80 ± 0.08^{b}	14.23 ± 0.37^{b}	13.07 ± 0.35^{c}	14.98 ± 0.04	3.60 ± 0.04^{d}	1.770 ± 0.005^{c}	0.415 ± 0.02	28.51 ± 1.60^{c}	211.8 ± 8.2^{ef}
HO4	83.68 ± 0.30^{h}	2.06 ± 0.05^{a}	15.23 ± 0.16^{a}	12.13 ± 0.23^{e}	16.93 ± 0.32	4.83 ± 0.04^{b}	2.203 ± 0.013^{b}	0.373 ± 0.00	44.05 ± 3.04^{b}	229.7 ± 4.6^{de}
HO_{mean}	87.94^{B}	1.35^{A}	12.77^{A}	13.36^{A}	13.50^{B}	2.74^{B}	1.419^{A}	0.462	25.13^{B}	205.7^{B}
Substitution rate (SR)										
Control	93.03 ± 0.30^{a}	0.62 ± 0.02^{d}	10.59 ± 0.09^{d}	14.20 ± 0.09^{a}	10.44±0.22^{e}	0.61 ± 0.02	0.695 ± 0.018^{e}	0.565 ± 0.014^{a}	17.97 ± 1.10^{d}	169.5 ± 11.4^{e}
25	89.86 ± 0.49^{b}	1.14 ± 0.21^{c}	10.66 ± 0.68^{d}	13.22 ± 0.74^{b}	12.17±0.70^{d}	1.86 ± 0.04	0.979 ± 0.052^{d}	0.501 ± 0.014^{b}	15.80 ± 2.47^{e}	220.3 ± 20.1^{d}
50	89.00 ± 1.44^{c}	1.27 ± 0.07^{b}	11.16 ± 1.50^{c}	12.70 ± 0.95^{c}	13.72±0.25^{c}	3.00 ± 0.20	1.325 ± 0.087^{c}	0.446 ± 0.009^{c}	25.75 ± 4.76^{c}	243.5 ± 34.6^{c}
75	88.08 ± 3.36^{d}	1.41 ± 0.43^{a}	11.94 ± 2.52^{b}	12.03 ± 1.16^{d}	15.23±0.32^{b}	4.02 ± 0.47	1.711 ± 0.065^{b}	0.421 ± 0.012^{d}	35.73 ± 8.00^{b}	287.4 ± 84.5^{b}
100	87.87 ± 4.59^{d}	1.46 ± 0.66^{a}	12.57 ± 2.92^{a}	11.03 ± 1.24^{e}	17.09±0.28^{a}	5.15 ± 0.36	2.084 ± 0.132^{a}	0.377 ± 0.007^{e}	51.71 ± 8.73^{a}	329.7 ± 109.8^{a}
$FT_{0.05}$	**	**	**	**	*	**	**	n.s.	**	**
$SR_{0.0}$	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
FT *x* $SR_{0.05}$	**	**	**	**	n.s.	**	**	n.s.	**	**

[1]All data are presented on a dry matter basis. In each column, means are differentiated by uppercase letters (flour types), lowercase letters (substitution levels), and italic letters (interaction effects). Statistical significance is indicated by ** for *p<0.01* and * for * *(p≤0.05);* n.s. = not significant. '±' represents the standard deviation. Abbreviations: Control = bread flour; HB1–HB4 = bread flour substituted with 25%, 50%, 75%, and 100% hull-less barley flour; HO1–HO4 = bread flour substituted with 25%, 50%, 75%, and 100% hull-less oat flour. HBmean and HOmean refer to the average values for hull-less barley and oat flour treatments, respectively. Color parameters: L* = lightness, a* = red–green, b* = yellow–blue

Table 2. The gluten-quality-related properties of flours substituted by hull-less barley and oat WGFs

	SRC lactic acid %	Sedimentation value ml	Glutopeak BEM GPU	GlutoPeak PMT s	Alveograph extensibility, L mm	Alveograph energy, W 10^{-4} *x* J
Flour types (FT)						
Control	102.3 ± 1.7	53.0 ± 2.0^{a}	70.0 ± 1.0^{a}	41.7 ± 0.6^{bc}	27.67 ± 2.52	168.0 ± 9.5^{b}
HB1	104.2 ± 2.6	51.3 ± 0.6^{a}	65.7 ± 3.8^{ab}	36.3 ± 2.5^{c}	22.67 ± 2.08	146.7 ± 27.3^{b}
HB2	122.4 ± 0.3	48.0 ± 1.0^{b}	59.0 ± 2.7^{c}	37.3 ± 1.2^{c}	13.67 ± 0.58	78.0 ± 3.6^{c}
HB3	142.8 ± 12.7	44.0 ± 1.0^{c}	60.0 ± 7.2^{c}	50.7 ± 8.7^{b}	9.33 ± 1.53	58.0 ± 9.5^{c}
HB4	179.8 ± 6.4	42.0 ± 1.7^{c}	48.7 ± 1.5^{d}	12.3 ± 0.6^{d}	-	-
HB_{mean}	130.3^{A}	47.7^{A}	60.7^{A}	35.7^{B}	18.33	112.7^{B}
HO1	95.4 ± 2.0	35.0 ± 3.0^{d}	60.7 ± 2.5^{bc}	33.3 ± 2.1^{c}	20.67 ± 1.53	199.3 ± 15.1^{a}
HO2	106.0 ± 4.1	24.3 ± 1.2^{e}	46.0 ± 1.0^{d}	37.3 ± 4.0^{c}	14.67 ± 0.58	73.3 ± 1.5^{c}
HO3	127.9 ± 2.3	15.0 ± 1.0^{f}	35.7 ± 3.2^{e}	91.7 ± 13.1^{a}	10.67 ± 0.58	65.3 ± 4.2^{c}
HO4	175.4 ± 7.0	8.7 ± 0.6^{g}	39.3 ± 2.5^{e}	93.7 ± 6.8^{a}	-	-
HO_{mean}	121.4^{B}	27.2^{B}	50.3^{B}	59.5^{A}	18.42	126.5^{A}
Substitution rates (SR)						
Control	102.3 ± 1.5^{d}	53.0 ± 1.8^{a}	70.0 ± 0.9^{a}	41.7 ± 0.5^{c}	27.67 ± 2.25^{a}	168.0 ± 8.5^{a}
25	99.8 ± 5.3^{d}	43.2 ± 9.2^{b}	63.2 ± 4.0^{b}	34.8 ± 2.6^{c}	21.67 ± 1.97^{b}	173.0 ± 35.0^{a}
50	114.2 ± 9.3^{c}	36.2 ± 13.0^{c}	52.5 ± 7.3^{c}	37.3 ± 2.7^{c}	14.17 ± 0.75^{c}	75.7 ± 3.6^{b}
75	135.4 ± 11.5^{b}	29.5 ± 15.9^{d}	47.8 ± 14.2^{d}	71.2 ± 24.6^{a}	10.00 ± 1.26^{d}	61.7 ± 7.7^{b}
100	177.6 ± 6.4^{a}	25.3 ± 18.3^{e}	44.0 ± 5.4^{d}	53.0 ± 44.8^{b}	-	-
$FT_{0.05}$	*	**	**	**	n.s.	*
$SR_{0.05}$	**	**	**	**	**	**
FT *x* $SR_{0.05}$	n.s	**	**	**	n.s.	*

Values in the same column followed by different uppercase letters (flour types), lowercase letters (substitution levels), or italic letters (interaction effects) are significantly different at the 5% level (*p≤0.05*). Statistical significance is indicated by ** *(p<0.01)* and * *(p≤0.05);* n.s.: not significant. ± indicates standard deviation. Abbreviations: Control = bread flour; HB1–HB3 = bread flour substituted with 25%, 50%, and 75% hull-less barley flour; HB4 = 100% hull-less barley flour; HO1–HO3 = bread flour substituted with 25%, 50%, and 75% hull-less oat flour; HO4 = 100% hull-less oat flour; HBmean = mean of hull-less

barley flour treatments; HOmean = mean of hull-less oat flour treatments. BEM = GlutoPeak maximum torque; PMT = GlutoPeak peak maximum time; L = alveograph extensibility; W = alveograph energy; SRC = solvent retention capacity

Similarly, the SDS sedimentation values of hull-less barley flour were much greater (47.7 ml). Even at 75% and 100% replacement rates, sedimentation values increased to over 40.0 ml when hull-less barley WGF was included. At all replacement rates, hull-less barley flour exhibited greater sedimentation values than hull-less oat flour. In 100% hull-less oat flour, the value decreased to 8.7 ml (Figure 1d). Hull-less barley flour had a higher amount of β-glucan, which is mainly insoluble, and it prevents swelling and precipitation of gluten proteins in the sedimentation solution. On the other hand, the β-glucan of hull-less oats is soluble and can't prevent sedimentation. As the hull-less oat substitution rate increased, the sedimentation values decreased due to the gluten dilution, weakening of the gluten, and increasing formation of additional β-turns in the gluten with the effect of β-glucan [35].

Again, the reason for the high GlutoPeak maximum torque (BEM) of hull-less barley WGF (60.7 GPU) was because of a tenacious gluten with the interaction of β-glucan. With the addition of hull-less WGFs, gluten formation did not occur sufficiently, and GlutoPeak BEM decreased. PMT values decreased at 25% and 50% substitution rates but increased at higher levels. The highest PMT values were found at 75% and 100% hull-less oat substitutes. The alveograph energy (W) of hull-less barley WG was below those of hull-less oat flour (112.7 10^{-4} x J and 126.5 10^{-4} x J). As the substitution rate increased, the Alveograph L (extensibility) and W (energy) parameters decreased. Especially, the decrease in W value was much more obvious after the 50% replacement rate. Alveograph values could not be obtained at 100% substitution rates. These findings indicate that increasing the proportion of β-glucan in dough formulations may substantially alter its rheological characteristics, with potential implications for the texture and overall quality of the end product. The presence of high β-glucan levels may contribute to reduced gas-holding capacity and compromise the integrity of the gluten matrix [36]. Further research is needed to explore alternative formulations that could mitigate these effects while still enhancing the nutritional profile of the dough. The primary limitation that restricts the use of dough rheological tests, such as Alveograph, with whole grain flours is that the bran layer in the medium alters the dough's viscoelastic structure, making evaluations challenging. Nonetheless, in the study, it was able to get Alveograph results for all substitutes and control bread flour. Dough (L, W) and gluten aggregation properties (PMT, BEM) decreased, indicating that the dough was adversely impacted by the increase of the substitution rate. As a result, it is clear that with a 100% substitution rate, this situation will reach lower levels with even greater negativity.

3.4 Physicochemical properties of breads

The physicochemical hull-less barley and oat WGF breads are given in Table 3. Color significantly influences the consumer choices of end products [37]. Hull-less barley WGF breads outperformed hull-less oat breads in terms of crust b* and crumb a* (22.34 and 1.60, respectively). The hull-less oat WGF breads, however, showed higher crust and crumb L* values (65.74 and 64.76, respectively). Anthocyanins present in the aleurone layer or pericarp of hull-less barley produce blue and purple shades of grain color [6]. Additionally, zeaxanthin and lutein are the other two primary carotenoids found in hull-less barley grain [31]. Tortilla and pita bread made by incorporating 50% hull-less barley flour with wheat flour appeared darker than the control bread [38]. Specifically, the bread's crumb L* value declined below 60.0, and the a* value rose over 3.0 following a 50% substitution of hull-less barley flour. At all substitution rates, the a* values of hull-less oat crumb were approximately 2.0. With substitution of both flours, the crumb b* value increased but remained around 23.0. In the crumb, the a* and b* values increased as the substitution rate increased. Conversely, in the crust, the a* and b* values decreased (Figure 2a, 2b, 2c, 2d). By substituting hull-less oat and barley WGFs, minerals found more in aleurone, embryo, and pericarp tissues [26] were included in the breads and affected the color values (Figure 3).

The mean of the TPC and TAA of the hull-less barley breads was significantly higher than that of hull-less oats (179.8 mg GAE/100g and 346.9 µmol TE/g). Compared to hull-less oats, hull-less barley is richer in nutritional components such as β-glucan, limiting aminoacids, vitamins, phenolic and flavonoid compounds, starch, and total dietary fiber, and all the beneficial components in hull-less barley, including active antioxidants such as proanthocyanidins, are preserved during processing [39]. The high levels of total phenolic constituents—comprising phenolic acids, proanthocyanidins, tannins, flavonols, flavones, flavanones, lignans, and aminophenolic compounds—along with the strong antioxidant capacity of hull-less barley flour, contributed to significant increases in the total phenolic content (TPC) and total antioxidant activity (TAA) of the bread samples. Notably, a 50% replacement with hull-less barley whole grain flour (WGF) resulted in a TPC exceeding 200.0 mg GAE per 100 grams of bread. [8, 19, 30]. The breads that had more than 25% hull-less oat enrichment still had a TPC of about 150.0 mg GAE/100g. Once again, breads made with 100, 75, and 50% substitution rates of hull-less barley WGF had substantial amounts of TAA (540.5, 415.1, and 361.6 µmol TE/g, respectively). The TAA of breads obtained by substituting hull-less oat flour had a range between 235.9 µmol TE/g and 308.1 µmol TE/g (Figure 2f, 2g). TPC increased from 82.2 mg GAE/100g to 200.1 mg GAE/100g, and TAA from 192.1 µmol TE/g to 424.3 µmol TE/g in the breads as the substitution rate increased. Although the hull-less barley WGF breads had a higher moisture content (42.4%), there was nevertheless no noticeable increase in water activity. The ash content of the substituted

breads was close to each other (around 2%), and it was higher than the control bread. Hull-less barley WGF had a higher mean protein content (13.52%) than hull-less oats (13.22%). Compared to control breads, the protein content of breads prepared with both flours increased by 2.0% at a substitution rate of 25%. In breads produced with 100% substituted flour, it increased by more than 16.0%, increasing by about 1.0% at each consecutive substitution.

The mineral contents of breads substituted by hull-less barley and oat WGFs are shown in Table 4. Hull-less oat breads had higher amounts of calcium, manganese, phosphorus, and sulphur, but hull-less barley flour breads had higher amounts of iron, zinc, and potassium. Hull-less barley is recognized as a rich dietary source of essential micronutrients, including trace elements and minerals such as selenium, iron, magnesium, zinc, phosphorus, and copper [25]. The incorporation of aleurone, embryo, and pericarp layers of hull-less barley and oats WGFs in this study resulted in a linear rise in the mineral contents of breads with the increase of replacement rate ($p<0.01$) [26]. Specifically, it was discovered that breads made with more than 50% replacement rates of hull-less barley flour had iron concentrations ranging from 35.0 to 55 mg/kg. More than 30.0 mg/kg of zinc was present in bread produced with 50% hull-less barley WGF and 75% hull-less oat WGF.

3.5 *Bread physical, textural, sensory and SEM properties*

The physical, textural, and sensory properties of breads substituted by hull-less barley and oat WGFs are given in Tables 5 and 6. The dough and bread weights of hull-less barley WGF-substituted breads were higher than oat breads (175.2 g and 155.8 g). Hull-less barley WGF flour with a higher protein and β-glucan content enhanced absorption, raising the weights of the dough and bread. Hull-less barley breads had a lower specific volume (2.07) due to a denser structure. Bread-specific volumes reduced as the substitution rate of WGFs increased owing to the effect of bran [36, 37], lowering sedimentation and negatively affecting dough properties. The specific volumes of hull-less barley WGF breads at 75% and 100% replacement rates were much fewer than those of the control bread (1.40 and 1.54 ml/g). However, breads baked with the same substitutions of hull-less oat WGF had better specific volumes (1.89 and 1.78 ml/g). Particularly, the hull-less oat WGF breads with a 25% replacement had specific volumes that were nearly identical to the control bread (2.93 ml/g) (Figure 2h).

Table 3. Physicochemical properties of breads substituted by hull-less barley and oat WGFs[1]

	L* crust	a* crust	b* crust	L* crumb	a* crumb	b* crumb	Moisture content %	Protein content %	β-glucan content %	Ash content %	Water activity	Total phenolic content mg GAE/100 g	Antioxidant activity µmol TE/g
Flour type (FT)													
Control HB1	61.93 ± 1.81	8.06 ±0.44^{a}	23.48 ± 1.49^{a}	64.35 ± 1.89^{bc}	-1.17 ± 0.12^{e}	17.82 ± 0.77	39.16 ± 1.27^{c}	10.38 ± 0.26	0.36 ± 0.01^{g}	1.754 ± 0.272	0.907 ± 0.01	82.2 ± 4.8^{f}	192.1 ± 16.5^{g}
HB2	61.44 ± 2.17	8.25 ± 1.08^{a}	22.91 ± 1.01^{a}	64.61 ± 1.37^{b}	0.32 ± 0.28^{d}	20.41 ± 1.16	41.11 ± 1.30^{b}	12.34 ± 0.11	1.63 ± 0.02^{f}	1.855 ± 0.009	0.926 ± 0.03	137.0 ± 5.5^{d}	225.3 ± 40.0^{fg}
HB3	65.17 ± 0.82	4.75 ± 0.36^{c}	23.73 ± 1.26^{a}	66.26 ± 1.09^{ab}	1.94 ± 0.11^{c}	23.34 ± 0.94	41.78 ± 0.22^{b}	13.36 ± 0.12	3.03 ± 0.01^{d}	2.081 ± 0.041	0.918 ± 0.03	200.1 ± 3.2^{b}	361.6 ± 9.2^{c}
HB4	66.46 ± 1.18	4.43 ± 0.31^{c}	22.26 ± 0.67^{ab}	59.89 ± 2.00^{de}	3.33 ± 0.42^{a}	23.49 ± 1.27	42.40 ± 0.66^{b}	14.91 ± 0.14	3.62 ± 0.02^{c}	2.378 ± 0.021	0.935 ± 0.02	234.4 ± 2.4^{a}	415.1 ± 13.7^{b}
HB$_{mean}$	66.57 ± 0.71	4.18 ± 0.53^{c}	19.34 ± 3.15^{c}	58.85 ± 1.10^{e}	3.59 ± 0.12^{a}	22.64 ± 0.79	46.22 ± 0.15^{a}	16.61 ± 0.04	4.53 ± 0.02^{a}	2.699 ± 0.031	0.909 ± 0.02	245.4 ± 14.9^{a}	540.5 ± 27.5^{a}
HO1 HO2	64.31^{B}	5.93	22.34^{A}	62.79 ^{B}	1.60^{A}	21.54	42.14^{A}	13.52^{A}	2.63^{A}	2.153	0.919	179.8^{A}	346.9^{A}
HO3 HO4	63.73 ± 2.48	8.20 ± 0.61^{a}	24.79 ± 1.85^{a}	68.37 ± 0.50^{a}	0.06 ± 0.20^{d}	19.18 ± 0.47	38.10 ± 0.38^{cd}	12.06 ± 0.08	1.64 ± 0.02^{f}	1.832 ± 0.049	0.891 ± 0.06	96.9 ± 6.6^{e}	235.9 ± 12.6^{f}
HO$_{mean}$	64.77 ± 0.35	6.46 ± 1.02^{b}	19.76 ± 2.42^{bc}	62.02 ± 1.15^{cd}	2.29 ± 0.12^{bc}	24.21 ± 0.33	37.47 ± 0.48^{d}	13.04 ± 0.08	2.83 ± 0.03^{e}	2.136 ± 0.026	0.899 ± 0.01	141.0 ± 3.5^{d}	254.6 ± 15.4^{ef}
	68.51 ± 1.21	2.57 ± 0.08^{d}	19.43 ± 0.18^{c}	63.88 ± 1.66^{bc}	2.35 ± 0.24^{b}	22.86 ± 0.92	38.12 ± 0.99^{cd}	14.52 ± 0.12	3.05 ± 0.05^{d}	2.412 ± 0.010	0.899 ± 0.05	156.9 ± 1.8^{c}	282.5 ± 22.0^{de}
	69.73 ± 1.28	2.71 ± 0.07^{d}	16.50 ± 0.60^{d}	65.19 ± 1.02^{b}	2.58 ± 0.10^{b}	23.33 ± 0.11	37.89 ± 0.18^{cd}	16.12 ± 0.21	4.11 ± 0.03^{b}	2.639 ± 0.004	0.908 ± 0.04	154.8 ± 13.2^{c}	308.1 ± 6.4^{d}
	65.74^{A}	5.60	20.79^{B}	64.76^{A}	1.22^{B}	21.48	38.15^{B}	13.22^{B}	2.40^{B}	2.155	0.901	126.4^{B}	254.6^{B}
Substitution rate (SR)													
Control	61.93 ± 1.62^{c}	8.06 ± 0.39^{a}	23.48 ±	64.35 ± 1.69^{b}	-1.17 ±	17.82 ± 0.68^{c}	39.16 ±	10.38 ± 0.23^{e}	0.36 ± 0.01^{e}	1.754 ±	0.907 ± 0.01	82.2 ± 4.3^{d}	192.1 ± 14.8^{e}
25	62.59 ± 2.43^{c}	8.23 ± 0.78^{a}	1.33^{ab}	66.49 ± 2.25^{a}	0.10^{d}	19.79 ± 1.04^{b}	1.13^{c}	12.20 ± 0.18^{d}	1.64 ± 0.02^{d}	0.24^{d}	0.908 ± 0.05	116.9 ± 22.6^{c}	230.6 ± 27.1^{d}
50	64.97 ± 0.61^{b}	5.60 ± 1.16^{b}	23.85 ± 1.69^{a}	64.14 ± 2.53^{b}	0.19 ±	23.77 ± 0.79^{a}	39.60 ±	13.20 ± 0.20^{c}	2.93 ± 0.11^{c}	1.844 ±	0.908 ± 0.02	170.6 ± 32.5^{b}	308.1 ± 59.7^{c}
75	67.49 ± 1.55^{a}	3.50 ± 1.04^{c}	21.74 ±	61.88 ±	0.26^{c}	23.18 ± 1.05^{a}	1.86^{bc}	14.72 ± 0.25^{b}	3.33 ± 0.32^{b}	0.03^{d}	0.917 ± 0.04	195.7 ± 42.5^{a}	348.8 ± 74.5^{b}
100	68.15 ± 1.97^{a}	3.45 ± 0.87^{c}	2.78^{bc}	2.74^{c}	2.12 ±	22.99 ± 0.63^{a}	39.63 ±	16.36 ± 0.30^{a}	4.32 ± 0.23^{a}	2.108 ±	0.909 ± 0.03	200.1 ± 51.2^{a}	424.3 ± 128.5^{a}
			20.85 ± 1.61^{c}	62.02 ± 3.60^{c}	0.22^{b}		2.39^{bc}			0.04^{c}			
			17.92 ± 2.55^{d}		2.84 ± 0.62^{a}		40.26 ±			2.395 ±			
					3.09 ± 0.56^{a}		2.46^{b}			0.02^{b}			
							42.06 ±			2.669 ±			
							4.56^{a}			0.04^{a}			
FT$_{0.05}$	*	n.s.	*	*	**	n.s.	**	*	**	n.s.	n.s.	**	**
SR$_{0.05}$	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	n.s.	**	**
FT *x* SR$_{0.05}$	n.s.	*	*	**	**	n.s.	**	n.s.	**	n.s.	n.s.	**	**

[1]Values (except for moisture content and water activity) are expressed on a dry matter basis. Means within the same column followed by different uppercase letters (for flour types), lowercase letters (for substitution levels), or italic letters (for their interaction) are significantly different ($p\leq0.05$). Differences significant at the 1% and 5% levels are indicated by ** and , respectively; n.s.: not significant; ±: standard deviation. Control = bread flour; HB1–HB3 = control flour substituted with 25%, 50%, and 75% hull-less barley flour; HB4 = 100% hull-less barley flour; HO1–HO3 = control flour substituted with 25%, 50%, and 75%

hull-less oat flour; HO4 = 100% hull-less oat flour; HBmean = mean of hull-less barley flour treatments; HOmean = mean of hull-less oat flour treatments. L* = lightness, a* = red–green, b* = yellow–blue color coordinates.

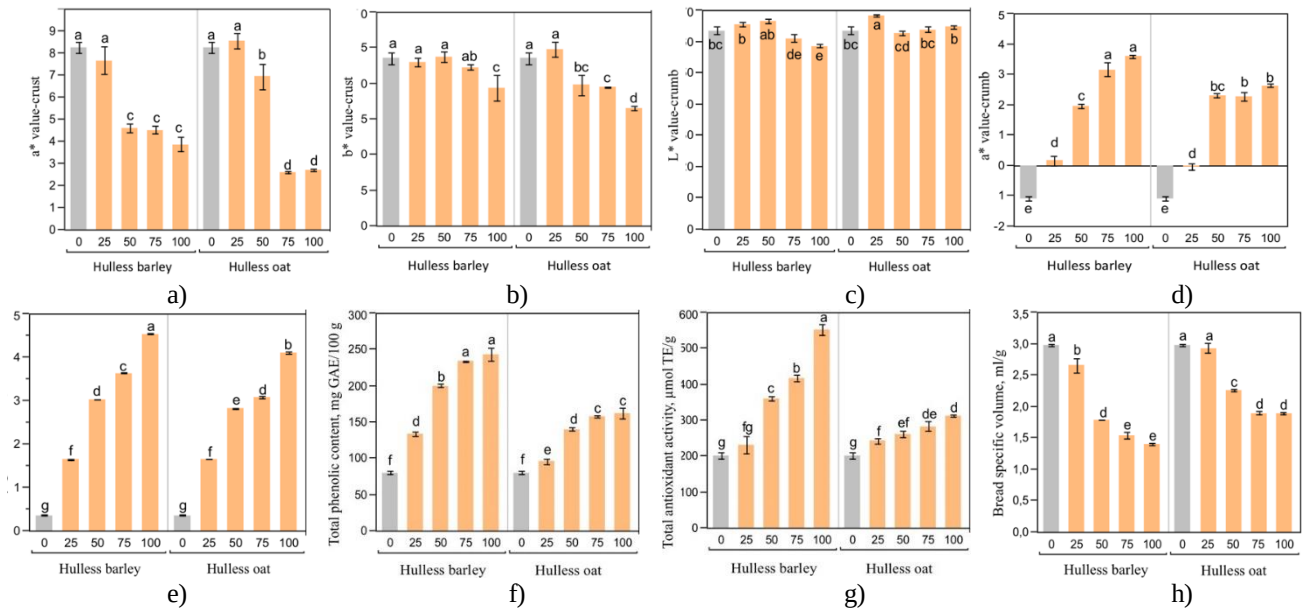


Figure 2. The β-glucan, total phenolic content (TPC), total antioxidant activity (TAA), color and specific volume of breads substituted by hull-less barley and oat flours. Different letters next to the means within the same column indicate statistically significant differences ($p \leq 0.05$)

Table 4. The mineral contents of breads substituted by hull-less barley and oat WGFs[1]

	Ca mg/kg	Cu mg/kg	Fe mg/kg	K mg/kg	Mg mg/kg	Mn mg/kg	P mg/kg	S mg/kg	Zn mg/kg
Flour type (FT)									
Control	236.6 ± 4.9^{h}	1.37 ± 0.02^{f}	15.19 ± 2.47^{h}	1386.5 ± 3.5^{h}	353.1 ± 6.1	6.27 ± 0.02^{h}	1101.5 ± 16.3^{f}	1248.0 ± 1.4^{g}	8.36 ± 0.84^{f}
HB1	316.8 ± 14.2^{g}	2.68 ± 0.02^{e}	25.08 ± 0.71^{ef}	2153.0 ± 5.7^{g}	618.3 ± 12.2	10.61 ± 0.07^{g}	1904.5 ± 38.9^{e}	1402.5 ± 2.1^{f}	21.06 ± 0.56^{d}
HB2	387.2 ± 15.1^{f}	4.09 ± 0.03^{c}	36.41 ± 1.20^{c}	2935.0 ± 86.3^{e}	857.6 ± 19.3	14.79 ± 0.35^{f}	2743.0 ± 58.0^{d}	1548.5 ± 79.9^{de}	34.30 ± 1.78^{c}
HB3	424.5 ± 2.2^{e}	5.43 ± 0.03^{b}	42.98 ± 1.35^{b}	3435.5 ± 19.1^{c}	1037.0 ± 32.5	17.43 ± 0.34^{e}	3300.5 ± 68.6^{c}	1612.0 ± 7.1^{d}	43.12 ± 0.52^{b}
HB4	516.1 ± 2.8^{c}	7.03 ± 0.08^{a}	55.21 ± 0.06^{a}	4422.0 ± 28.3^{a}	1334.0 ± 1.4	21.51 ± 0.05^{d}	4242.0 ± 94.8^{a}	1876.5 ± 68.6^{b}	57.54 ± 0.90^{a}
HB$_{mean}$	376.2^{B}	4.12	34.97^{A}	2866.4^{A}	840.0	14.12^{B}	2658.3^{B}	1537.5^{B}	32.87^{A}
HO1	346.5 ± 12.7^{g}	2.53 ± 0.10^{e}	18.94 ± 1.00^{g}	2079.5 ± 40.3^{g}	895.1 ± 36.5	21.09 ± 0.06^{d}	2005.0 ± 91.9^{e}	1494.5 ± 17.7^{ef}	14.50 ± 0.49^{e}
HO2	464.6 ± 5.0^{d}	3.61 ± 0.04^{d}	24.90 ± 0.68^{f}	2705.5 ± 105.4^{f}	1093.0 ± 21.2	33.06 ± 0.08^{c}	2833.0 ± 25.5^{d}	1744.5 ± 24.8^{c}	19.72 ± 0.28^{d}
HO3	619.6 ± 31.9^{b}	5.71 ± 0.14^{b}	28.17 ± 0.10^{e}	3241.0 ± 7.1^{d}	1336.0 ± 0.0	55.48 ± 2.46^{b}	3613.5 ± 47.4^{b}	2092.5 ± 68.6^{a}	33.27 ± 0.37^{c}
HO4	780.3 ± 20.9^{a}	7.22 ± 0.44^{a}	31.91 ± 1.44^{d}	3823.0 ± 43.8^{b}	858.6 ± 365.1	72.71 ± 1.55^{a}	4312.5 ± 29.0^{a}	2110.0 ± 50.9^{a}	41.09 ± 2.18^{b}
HO$_{mean}$	489.5^{A}	4.09	23.82^{B}	2647.1^{B}	858.6	37.72^{A}	2773.1^{A}	1737.9^{A}	23.39^{B}
Substitution rate (SR)									
Control	236.6 ± 4.0^{e}	1.37 ± 0.02^{e}	15.19 ± 2.01^{e}	1386.5 ± 2.9^{e}	353.1 ± 4.97^{e}	6.27 ± 0.02^{e}	1101.5 ± 13.3^{e}	1248.0 ± 1.2^{e}	8.36 ± 0.68^{e}
25	331.6 ± 20.4^{d}	2.60 ± 0.11^{d}	22.01 ± 3.62^{d}	2116.3 ±	617.1 ± 16.17^{d}	15.85 ± 6.05^{d}	1954.8 ± 81.8^{d}	1448.5 ± 54.1^{d}	17.78 ± 3.81^{d}
50	425.9 ± 45.6^{c}	3.85 ± 0.28^{c}	30.66 ± 6.69^{c}	2820.3 ±	876.3 ± 32.22^{c}	23.93 ± 10.55^{c}	2788.0 ± 63.5^{c}	1646.5 ± 123.0^{c}	27.01±8.48^{c}
75	522.0 ± 114.1^{b}	5.57 ± 0.18^{b}	35.57 ± 8.58^{b}	3338.3 ±	1065.0 ± 39.34^{b}	36.46 ± 22.01^{b}	3457.0 ± 187.0^{b}	1852.3 ± 280.3^{b}	38.19 ± 5.70^{b}
100	648.2 ± 153.0^{a}	7.12 ± 0.28^{a}	43.56 ± 13.48^{a}	4122.5 ±	1335.0 ± 1.41^{a}	47.11 ± 29.57^{a}	4277.3 ± 70.2^{a}	1993.3 ± 143.6^{a}	49.31 ± 9.59^{a}
FT$_{0.05}$	**	n.s.	**	**	n.s.	**	*	*	**
SR$_{0.05}$	**	**	**	**	**	**	**	**	**
FT x SR$_{0.05}$	**	*	**	**	n.s.	**	*	*	**

[1]All values were adjusted based on dry matter content. In each column, means followed by different uppercase letters (flour types), lowercase letters (substitution levels), and italic letters (interaction effects) indicate significant differences ($p \leq 0.05$). Significance levels are denoted as follows: ** for $p<0.01$, * for $p \leq 0.05$, and n.s. for non-significant results. '±' indicates the standard deviation. Abbreviations: Control = bread flour; HB1–HB3 = bread flour substituted with 25%, 50%, and 75% hull-less barley flour; HB4 = 100% hull-less barley flour; HO1–HO3 = bread flour substituted with 25%, 50%, and 75% hull-less oat flour; HO4 = 100% hull-less oat flour; HBmean = average of hull-less barley flour treatments; HOmean = average of hull-less oat flour treatments. Mineral symbols: Ca = calcium, Cu = copper, Fe = iron, K = potassium, Mg = magnesium, Mn = manganese, P = phosphorus, S = sulphur, Zn = zinc

Figure 3. The breads of substituted by hull-less barley and oat flours and color measurement

In texture profile analysis (TPA), some textural parameters were not available at 75% and 100% substitution rates. Hull-less barley WGF breads had higher levels of cohesiveness, adhesiveness, and springiness (0.81, -1.31, and 0.54, respectively) than hull-less oat breads. Because the bread volume decreased, these textural characteristics of hull-less barley breads deteriorated. In general, firmness, gumminess, and adhesiveness increased, whereas cohesiveness and springiness decreased as the substitution rate increased. The fiber-rich bran layer disrupted the interactions between starch and protein, causing the bread to become harder and less flexible [40]. In addition, as the bread volume decreased, the bread became denser and firmer, which increased its firmness [41]. The firmness of both flour breads increased in a straight line as the substitution rate increased. At 75% and 100% substitution rates, the firmness was very high (>4500 g). The firmness of hull-less barley breads (940.4 g) was closest to the control at a 25% substitution rate (Table 5).

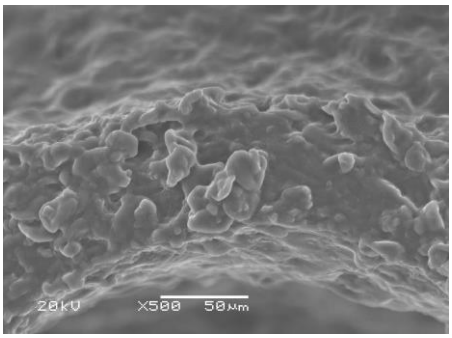
Breads prepared with oat WGF had better crust and crumb colors, appearance, and pore structure, whereas breads made with barley flour had better chewiness, crumb structure, and taste (Table 6). Some hull-less barley and oat WGF replacement breads were appreciated for certain sensory attributes, despite the low bread volumes and high firmness. As the substitution rate increased, scores for all sensory features decreased. At a 25% replacement rate, all sensory scores were higher than 6.0. The sensory scores were near or over the acceptable threshold of 5.0 at a 50% replacement rate. All sensory scores, however, sharply declined over this replacement rate. Overall, at 25% and 50% replacement rates, hull-less barley breads had higher sensory scores than hull-less oat breads. The hull-less oats had better color values and appearance in both parts of the bread at 75% and 100% substitution rates. At these maximum replacement ratios, hull-less oat breads showed greater L* (brightness) and lower a* (redness) values in the crust and crumb. Although hull-less barley breads had a very low bread volume at 75% and 100% replacement rates, they did not score any lower than hull-less oat bread in terms of chewiness, taste, or crumb structure. Sensory evaluations indicated that panelists positively received breads containing moderate flours, suggesting a promising avenue for enhancing both health benefits and consumer acceptance.

The SEM (scanning electron microscope) images showed that the gluten network could not develop in the crumbs of breads of both flour types at a 100% substitution rate due to the high substitution of β-glucan into the medium (Figure 4b, 4f), and there was sufficient gluten network formation in the crumb of control bread (Figure 4a). Again, it was observed that gluten development did not occur in breads of 50% and 75% hull-less barley WGF substitution (Figure 4c, 4d) and 75% hull-less oat WGF (Figure 4g), and a tight structure was observed. Even with a 25% substitution rate in hull-less barley WGF breads, gluten development and therefore the volume increase in the breads were insufficient (Figure 4e). On the other hand, in hull-less oat WGF bread, it was observed that the gluten network started to grow at a 50% substitution rate and that the development of the gluten network became more noticeable at the 25% rate (Figure 4h, 4i).

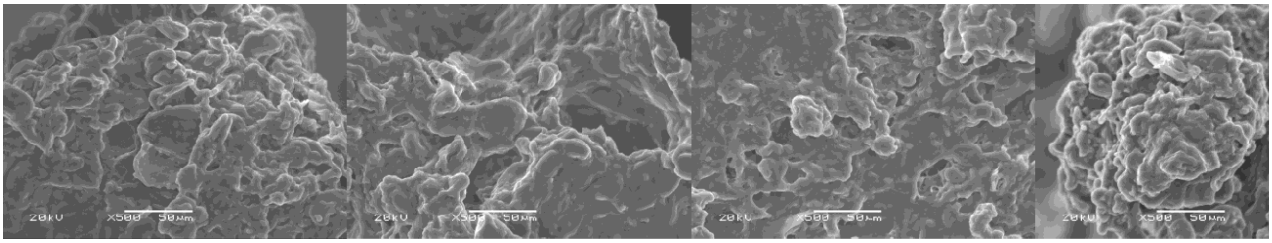
3.6 β-glucan contents of breads

β-glucan contents of breads substituted by hull-less barley and oat WGFs are given in Table 3. Similar to WGFs, β-glucan was significantly higher in hull-less barley bread than in hull-less oat bread (2.63% and 2.40%). Hull-less barley has higher amounts of β-glucan and other nutrients [7, 39]. Hull-less barley and oat β-glucan have important health benefits, such as lowering serum cholesterol, reducing glucose uptake and plasma insulin response, and providing weight control with prolonged satiety [42]; they can also be used to improve the nutritional quality of bread. It was stated that the β-glucan content increased from 1.44% to 2.83% when 15% hull-less oat flour was substituted for bread flour, and it rose to 3.50% when 30%

was substituted [22]. It was reported that the amount of β-glucan and dietary fiber in bread increased significantly with hull-less barley incorporation [43]. The β-glucan content of breads of both WGFs increased due to increasing substitution rates, and it was found to be the highest in the whole hull-less barley and oat WGF breads (4.53% and 4.11%). The β-glucan content increased by over 3.0% at 50% and 3.5% at 75% of hull-less barley WGF replacement breads. Breads obtained with a 50% replacement rate of hull-less oats also had a β-glucan content close to 3.0 g (2.83%), and it was 3.05% at a 75% replacement rate (Figure 2e). A recent investigation formulated functional bazlama by enriching bread flour with varying proportions (15%, 30%, 45%, and 60%) of high β-glucan hull-less barley flour (cv. Chifaa). The target intake level of 3 g β-glucan was achieved in formulations containing 45% and 60% barley flour [14]. Our study indicated that the recommended 3 g/day β-glucan requirement can be fully compensated for by consuming 100 grams of bread with a 50% substitution rate in hull-less barley and a 75% substitution rate in hull-less oat. With a 50% replacement rate of hull-less oats WGFs, we can approach the limit of the health claim. This indicated that incorporating these WGFs in bread meets the nutritional guidelines for β-glucan.



Control bread
a)

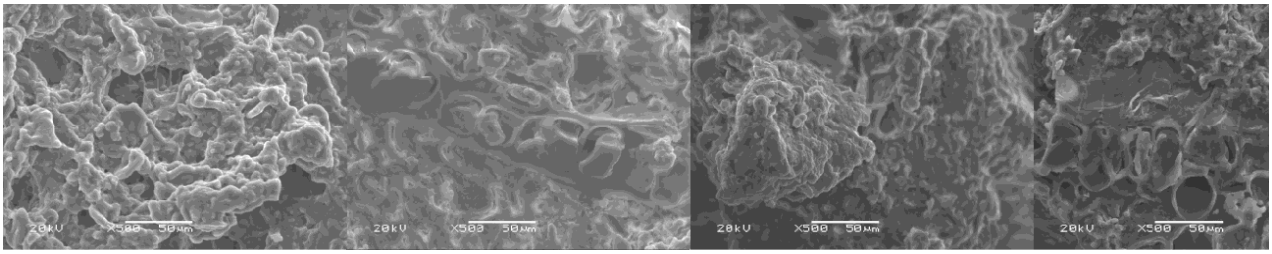


Hull-less barley (%100)
b)

Hull-less barley (%75)
c)

Hull-less barley (%50)
d)

Hull-less barley (%25)
e)



Hull-less oat (%100)
f)

Hull-less oat (%75)
g)

Hull-less oat (%50)
h)

Hull-less oat (%25)
i)

Figure 4. SEM (scanning electron microscope) images of crumbs of breads substituted by hull-less barley and oat WGFs at 500× magnification

Table 5. The physical and textural properties of breads substituted by hulless barley and oat WGFs

	Dough weight g	Bread weight g	Spesific volume ml/g	Firmness g	Adhesiveness	Springiness %	Cohesiveness %	Gumminess g
Flour type (FT)								
Control	166.1 ± 0.9^{d}	146.9 ± 0.1^{de}	2.98 ± 0.03^{a}	681.2 ± 47.7^{f}	-0.12 ± 0.10	0.56 ± 0.02^{b}	0.85 ± 0.01^{a}	580.4 ± 32.3^{d}
HB1	170.9 ± 0.9^{c}	149.5 ± 2.9^{cd}	2.66 ± 0.16^{b}	940.4 ± 252.2^{f}	-0.88 ± 0.92	0.52 ± 0.05^{b}	0.82 ± 0.03^{a}	768.6 ± 177.4^{d}
HB2	172.6 ± 1.7^{c}	155.5 ± 1.4^{bc}	1.78 ± 0.01^{d}	3602.5 ± 417.1^{c}	-2.93 ± 1.22	0.45 ± 0.05^{c}	0.76 ± 0.04^{b}	2747.2 ± 182.2^{a}
HB3	177.7 ± 0.6^{b}	157.5 ± 5.2^{b}	1.54 ± 0.07^{e}	5359.8 ± 5.7^{a}	-	0.52 ± 0.00^{b}	-	-
HB4	188.7 ± 1.3^{a}	169.7 ± 0.1^{a}	1.40 ± 0.02^{e}	5384.3 ± 4.4^{a}	-	0.65 ± 0.03^{a}	-	-
HB$_{mean}$	175.2^{A}	155.8^{A}	2.07^{B}	3193.6	-1.31^{A}	0.54^{A}	0.81^{A}	1365.4
HO1	165.8 ± 1.1^{d}	145.1 ± 4.1^{de}	2.93 ± 0.11^{a}	1516.1 ± 146.8^{e}	-0.28 ± 0.04	0.33 ± 0.01^{d}	0.70 ± 0.00^{c}	1062.9 ± 97.5^{c}
HO2	161.9 ± 0.7^{f}	142.9 ± 0.0^{e}	2.26 ± 0.02^{c}	3050.3 ± 92.5^{d}	-0.60 ± 0.09	0.29 ± 0.00^{de}	0.68 ± 0.01^{c}	2065.3 ± 95.3^{b}
HO3	162.5 ± 0.1^{ef}	150.5 ± 3.2^{cd}	1.89 ± 0.04^{d}	4550.1 ± 40.0^{b}	-	0.25 ± 0.01^{e}	-	-
HO4	164.6 ± 1.3^{de}	150.4 ± 3.4^{cd}	1.89 ± 0.03^{d}	5349.7 ± 3.4^{a}	-	0.32 ± 0.01^{d}	-	-
HO$_{mean}$	164.2^{B}	147.2^{B}	2.39^{A}	3029.5	-0.33^{B}	0.35^{B}	0.74^{B}	1236.2
Substitution rate (SR)								
Control	166.1 ± 0.7^{d}	146.9 ± 0.1^{c}	2.98 ± 0.02^{a}	681.2 ± 39.0^{e}	-0.12 ± 0.08^{a}	0.56 ± 0.02^{a}	0.85 ± 0.01^{a}	580.4 ± 26.4^{c}
25	168.4 ± 3.0^{c}	147.3 ± 3.9^{c}	2.79 ± 0.19^{b}	1228.2 ± 372.6^{d}	-0.58 ± 0.63^{a}	0.43 ± 0.11^{c}	0.76 ± 0.07^{b}	915.7 ± 206.2^{b}
50	167.3 ± 6.3^{cd}	149.2 ± 7.3^{c}	2.02 ± 0.27^{c}	3326.4 ± 403.1^{c}	-1.76 ± 1.52^{b}	0.37 ± 0.10^{d}	0.72 ± 0.06^{c}	2406.3 ± 411.2^{a}
75	170.1 ± 8.8^{b}	154.0 ± 5.3^{b}	1.72 ± 0.21^{d}	4954.9 ± 468.0^{b}	-	0.38 ± 0.16^{d}	-	-
100	176.7 ± 14.0^{a}	160.1 ± 11.3^{a}	1.64 ± 0.28^{d}	5367.0 ± 20.3^{a}	-	0.49 ± 0.19^{b}	-	-
FT$_{0.05}$	**	**	**	n.s.	*	**	*	n.s.
SR$_{0.05}$	**	**	**	**	*	**	**	**
FT x SR$_{0.05}$	**	*	*	*	n.s.	**	*	*

In each column, means followed by different uppercase letters (flour types), lowercase letters (substitution levels), and italic letters (interaction effects) differ significantly at the $p \leq 0.05$ level. Statistical significance is indicated by ** for $p < 0.01$ and * for $p \leq 0.05$; n.s. = not significant. '±' denotes the standard deviation. Abbreviations: Control = bread flour; HB1–HB3 = control flour substituted with 25%, 50%, and 75% hull-less barley flour; HB4 = 100% hull-less barley flour; HO1–HO3 = control flour substituted with 25%, 50%, and 75% hull-less oat flour; HO4 = 100% hull-less oat flour; HBmean = mean of hull-less barley flour treatments; HOmean = mean of hull-less oat flour treatments

Table 6. The sensory properties of breads substituted by hull-less barley and oat WGFs

	Crust color	Crumb color	Appearance	Pore structure	Crumb structure	Taste	Chewiness
Flour types (FT)							
Control	7.14 ± 2.18	7.93 ± 1.54^{a}	8.21 ± 0.97^{a}	7.71 ± 1.14	7.71 ± 0.83	7.79 ± 1.12	7.71 ± 1.14
HB1	6.36 ± 2.13	6.64 ± 1.39^{ab}	7.07 ± 1.38^{ab}	6.71 ± 1.54	6.57 ± 1.60	6.86 ± 1.70	7.14 ± 1.41
HB2	5.64 ± 1.78	5.64 ± 1.65^{bc}	4.86 ±1.23^{cd}	4.29 ± 1.98	5.86 ± 2.14	5.79 ± 2.22	5.86 ± 2.03
HB3	2.93 ± 1.14	2.93 ± 1.14^{ef}	2.43 ± 1.02^{e}	3.00 ± 1.92	4.29 ± 2.09	4.36 ± 2.92	4.43 ± 2.98
HB4	2.43 ± 0.94	2.43 ± 0.85^{f}	2.79 ± 1.53^{e}	2.71 ± 2.05	3.86 ± 2.41	3.79 ± 2.86	4.21 ± 2.55
HB$_{mean}$	4.90	5.11	5.07^{B}	4.89	5.66^{A}	5.71^{A}	5.87^{A}
HO1	5.93 ± 1.82	5.64 ± 1.95^{bc}	5.93 ± 2.09^{bc}	5.79 ± 1.81	5.50 ± 2.21	5.57 ± 2.24	5.64 ± 2.44
HO2	5.21 ± 2.01	4.86 ± 1.79^{cd}	5.36 ± 1.82^{cd}	4.29 ± 1.33	4.29 ± 1.82	4.14 ± 2.03	4.00 ± 2.08
HO3	4.57 ± 1.99	4.93 ± 2.27^{cd}	4.50 ± 2.14^{d}	3.64 ± 1.34	3.36 ± 1.55	2.86 ± 1.56	2.71 ± 1.07
HO4	4.00 ± 1.52	4.21 ± 2.61^{de}	5.00 ± 2.11^{cd}	3.86 ± 1.88	3.21 ± 1.85	3.14 ± 1.83	2.29 ± 0.91
HO$_{mean}$	5.37	5.51	5.80^{A}	5.06	4.81^{B}	4.70^{B}	4.47^{B}
Substitution rate (SR)							
Control	7.14 ± 2.14^{a}	7.93 ± 1.51^{a}	8.21 ± 0.96^{a}	7.71 ± 1.12^{a}	7.71 ± 0.81^{a}	7.79 ± 1.10^{a}	7.71 ± 1.12^{a}
25	6.14 ± 1.96^{b}	6.14 ± 1.74^{b}	6.50 ± 1.84^{b}	6.25 ± 1.71^{b}	6.04 ± 1.97^{b}	6.21 ± 2.06^{b}	6.39 ± 2.10^{b}
50	5.43 ± 1.87^{b}	5.25 ± 1.73^{b}	5.11 ± 1.55^{c}	4.29 ± 1.65^{c}	5.07 ± 2.11^{c}	4.96 ± 2.25^{c}	4.93 ± 2.23^{c}
75	3.75 ± 1.80^{c}	3.93 ± 2.04^{c}	3.46 ± 1.95^{d}	3.32 ± 1.66^{d}	3.82 ± 1.87^{d}	3.61 ± 2.42^{d}	3.57 ± 2.36^{d}
100	3.21 ± 1.47^{c}	3.32 ± 2.11^{c}	3.89 ± 2.13^{d}	3.29 ± 2.02^{d}	3.54 ± 2.13^{d}	3.46 ± 2.38^{d}	3.25 ± 2.12^{d}
FT$_{0.05}$	n.s.	n.s.	*	n.s.	*	*	**
SR$_{0.05}$	**	**	**	**	**	**	**
FT x SR$_{0.05}$	n.s.	*	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

Means within the same column followed by different uppercase letters (flour types), lowercase letters (substitution levels), or italic letters (interaction effects) differ significantly at the $p \leq 0.05$ level. Significance at $p < 0.01$ and $p \leq 0.05$ is indicated by ** and , respectively; n.s. = not significant. ± indicates standard deviation. Abbreviations: Control = bread flour; HB1–HB3 = control flour substituted with 25%, 50%, and 75% hull-less barley flour; HB4 = 100% hull-less barley flour; HO1–HO3 = control flour substituted with 25%, 50%, and 75% hull-less oat flour; HO4 = 100% hull-less oat flour; HBmean = average of hull-less barley flour treatments; HOmean = average of hull-less oat flour treatments

4 Conclusion

This study examined the effect of replacing bread flour with hull-less barley and oat whole grain flour on the technological and nutritional characteristics of the flour and breads. The mean moisture and ash contents of hull-less oat-substituted flours were higher than those of hull-less barley. The ash content increased proportionally with the inclusion of the bran (aleurone, embryo, and pericarp) of hull-less barley and oat, which have significant amounts of minerals, into the flour. The substitute flours had higher levels of protein, TPC, TAA, and β-glucan than the control flour. The mean β-glucan, protein, TPC, and TAA of hull-less barley substitute flours were higher. Higher SRC lactic acid values were found in hull-less barley flour with a higher β-glucan amount. As dietary fibers like β-glucan were added at higher substitution rates, GlutoPeak maximum torque (BEM) declined and PMT increased, particularly following a 50% substitution rate, as a result of the delayed gluten formation. Due to the interaction and weakening of gluten with fibrous components, the dough's rheological properties deteriorated after a 50% substitution rate; the sedimentation, Alveograph energy, and extensibility of flours decreased below 30.0 ml, 100.0 10^{-4} x J, and 20.0 mm, respectively. Therefore, the specific volumes of bread decreased from 2.98 to 1.64. Hull-less barley bread had a higher dough and bread weight because it had more β-glucan, which reduced its specific volume. Breads made from hull-less barley flour had higher b* values in the crust and a* values in the crumb compared to hull-less oat flour, while the L* value was lower in both parts and the color of the breads was darker. Similar to the substitute flours, hull-less barley breads had higher amounts of protein, TPC, TAA, and β-glucan. In the study, hull-less barley breads had higher iron, potassium, and zinc, whereas hull-less oat breads had higher calcium, manganese, phosphorus, and sulphur. After the 25% substitution rate, the texturometer hardness of the breads of hull-less barley and oat increased noticeably. In the SEM imaging, even at a 25% substitution rate, hull-less barley flour breads lacked enough gluten development. The gluten network in hull-less oat breads began to expand at the 50% substitution rate and was more noticeable at 25%. In terms of sensory properties, breads of hull-less oat had better crust and crumb colors, appearance, and pore structure, whereas breads of hull-less barley had better chewiness, crumb structure, and taste. Breads with 25% substitute flour received sensory scores that were rather comparable to the control, while breads with 50% substitute flour had scores of about 5.0. It was found that consuming bread at a 75% substitution rate would provide the 3.0 g of β-glucan recommended by the EFSA for maintaining normal blood cholesterol levels and a normal body weight, and this value was approached at 50%. As a result of this study, it was determined that hull-less barley substitutes were much better at enhancing the nutritional qualities of bread, particularly β-glucan, whereas hull-less oat substitutes improved the final product quality. Although the properties of breads with a 50% substitution of both hull-less cereal flours were slightly negatively affected, they were found to be suitable for meeting nutritional needs, especially β-glucan.

Acknowledgement

This research was conducted as part of an MSc thesis (No. 853636) within the Department of Food Engineering at Eskişehir Osmangazi University and was financially supported by the Scientific Research Projects Coordination Unit of the same institution under Project Code FYL-2022-2513. The authors gratefully acknowledge Bahri Dağdaş International Agricultural Research Institute and Field Crops Central Research Institute for supplying the grain samples and NBC Agriculture Company for production of the samples.

Conflict of interest

The author declares that there are no conflicts of interest.

Similarity rate (iThenticate): 19 %

References

[1] J. M. Jones, CC Handbook of 21st Century Cereal Science and Technology. in: P.R. Shewry, H. Koksel and J.R. Taylor (Eds.), Role of Cereals in Nutrition and Health, pp. 31-43. Elsevier, 2023.

[2] P. Baniwal, R. Mehra, N. Kumar, S. Sharma and S. Kumar, Cereals: functional constituents and its health benefits. The Pharma Innovation International Journal, 10 (2), 343-349, 2021. https://doi.org/10.22271/tpi.2021.v10.i2e.5681.

[3] H. Koksel and P.R. Shewry, Cereal Science and Technology. in: H. Koksel, O. Acar, B. Cetiner and F. Koksel (Eds.), Cereal Proteins, pp. 71-91, Sidas, 2021.

[4] H. Guo, H . Wu, A . Sajid and Z . Li, Whole grain cereals: the potential roles of functional Components in human health. Critical Reviews potential roles of functional in human health. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 62 (30), 8388-8402, 2022. https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1928596.

[5] S. A. Wani, M. S. Elshikh, M. S. Al-Wahaibi and H. R. Naik, Functional Foods: Technological Challenges and Advancement in Health Promotion, CRC Press, 2023.

[6] H. K. Shaveta and S . Kaur, Hull-less barley: A new era of research for food purposes. Journal of Cereal Research, 11 (2), 114-124, 2019. doi.org/10.25174/2249-4065/2019/83719.

[7] S. Narwal, D . Kumar, S.Sheoran, R.P.S. Verma and R.K. Gupta, Hull-less barley as a promising source to improve the nutritional quality of wheat products. Journal of Food Science, 54, 2638–2644, 2017. https://doi.org/10.1007/s13197-017-2669-6.

[8] A.V. Zheleznov, T.V. Kukoeva and N.B. Zheleznova, Naked barley: origin, distribution and prospects of utilisation. Vavilov Journal of Genetics and Breeding, 17 (2), 286-297, 2013.

[9] W. Biel, K. Bobko and R. Maciorowski, Chemical composition and nutritive value of husked and naked

oats grain. Journal of Cereal Science, 49 (3), 413-418, 2009. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2009.01.009.

[10] P. Mattila, J.M. Pihlava and J. Hellström, Contents of phenolic acids, alkyl andalkenylresorcinols, and avenanthramides in commercial grain products. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 53, (21), 8290-8295, 2005. https://doi.org/10.1021/jf051437z.

[11] H. Bobade, A. Gupta and S. Sharma, Beta-glucan. In Nutraceuticals and Health Care, Academic Press, pp. 343-358, 2022.

[12] N.D.A. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA). Scientific Opinion on the substantiation of health claims related to beta-glucans from oats and barley and maintenance of normal blood LDL-cholesterol concentrations (ID 1236, 1299), increase in satiety leading to a reduction in energy intake (ID 851, 852), reduction of post-prandial glycaemic responses (ID 821, 824), and "digestive function"(ID 850) pursuant to Article 13 (1) of Regulation (EC) No 1924/2006. EFSA Journal, 9 (6), 2207, 2011.

[13] F. V. Boxstael F, H. Aerts, S. Linssen, J. Latré, A. Christiaens, G. Haesaert, I. Dierickx, J. Brusselle and W. A. De Keyzer, A comparison of the nutritional value of Einkorn, Emmer, Khorasan and modern wheat: whole grains, processed in bread, and population-level intake implications. Journal of the Science of Food and Agriculture, 100 (11), 4108-4118, 2020. DOI 10.1002/jsfa.10402.

[14] H. Koksel, Z. H. Tekin-Cakmak, S. Oruc, G. Kilic, K. Ozkan, B. Cetiner, O. Sagdic, F. Sestili and A. Jilal, A new functional wheat flour flatbread (bazlama) enriched with high-β-glucan hull-less barley flour. Foods, 13 (2), 326, 2024. https://doi.org/10.3390/foods13020326.

[15] AACCI, Approved Methods of Analysis, 11th edn., St. Paul, MN, USA: American Association of Cereal Chemists (AACC) International, 2010. https://www.cerealsgrains.org/resources/methods/Pages/default.aspx.

[16] C. Guzman, G. Posadas-Romano, N. Hernandez-Espinosa, A. Morales-Dorantes, R. J. Pena, A new standard water absorption criteria based on solvent retention capacity (SRC) to determine dough mixing properties, viscoelasticity, and bread-making quality. Journal of Cereal Science, 66, 59-65, 2015. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.10.009.

[17] Y. Karaduman, A. Sayaslan and A. Akın, GlutoPeak parameters of whole wheat flours for gluten quality evaluation in soft wheat breeding programs. Jounal of Cereal Science, 95, 103031, 1-11, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.103031.

[18] Y. Karaduman, S. S. Özer and A. Akın, Enrichment of a local sourdough bread with zinc and selenium through the use of biofortified whole wheat flour. Journal of Food Science Technology, 58 (9), 4562-4571, 2023. https://doi.org/10.1111/ijfs.16556.

[19] A.K. Holtekjolen, A.B. Baevre, M. Rødbotten, H. Berg and S.H. Knutsen, Antioxidant properties and sensory profiles of breads containing barley flour. Food Chemistry, 110 (2), 414421 2008. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.02.054.

[20] A. E. Yamlahi, E. Berny, A. Hammoumi and M. Ouhssine, Effect of barley (*Hordeum vulgare L.*) flour incorporation on the baking quality of wheat (*Triticum aestivum L.*) flour. Journal of Chemical and Pharmaceutical Reserch, 5 (2), 162-170, 2013. ISSN (Print): 0975-7384.

[21] B. Krochmal-Marczak, R. Tobiasz-Salach and J Kaszuba, The effect of adding oat flour on the nutritional and sensory quality of wheat bread. British Food Journal, 122 (7), 2329-2339. 2020. https://doi.org/10.1108/BFJ-07-2019-0493.

[22] R. S. Bhatty, The potential of hull-less barley. Cereal Chemistry, 199, 76 (5), 589–599, 1999. https://doi.org/10.1094/CCHEM.1999.76.5.589.

[23] P. F. Raguindin, O.A. Itodo, J. Stoyanov, G.M. Dejanovic, M. Gamba, E. Asllanaj, B. Minder, W. Bussler, B. Metzger, T. Muka, M. Glisic and H. Kern, A systematic review of phytochemicals in oat and buckwheat. Food Chemistry, 338, 127982. 2021https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127982.

[24] V. U. Ndolo and T. Beta, Distribution of carotenoids in endosperm, germ, and aleurone fractions of cereal grain kernels. Food Chemistry, 139, (1-4), 663–671, 2013. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.01.014.

[25] A. V. Rusu, C. T. Socol, S. P. Bangar, V. Coşier and M. Trif, Colored cereals: Genetics and chemistry of pigments. In Functionality and Application of Colored Cereals. Nutritional Bioactive, and Health Aspects, 111-134, 2023. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99733-1.00001-7.

[26] E. Marconi, M. Graziano and R. Cubadda, Composition and utilization of barley pearling by-products for making functional pastas rich in dietary fiber and β-glucans. Cereal Chemistry, 77 (2) , 133-139. 2000. https://doi.org/10.1094/CCHEM.2000.77.2.133.

[27] A. Özer and B. Özkaya, Effect of different hull-less barley varieties on the technological, textural, and nutritional properties of cookies. Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences, 12(1), 51-61. https://doi.org/10.30910/turkjans.1572312.

[28] O. Acar, B. Çetiner and E.A. Akyıldız, Cereal Science and Technology. in: H. Koksel, O. Acar, B. Cetiner and F. Koksel (Eds.), Nutritional Fibers, pp. 117-134, Sidas, 2021.

[29] N. Abdullah, A. Nawawi and Othman, I. (2000). Fungal spoilage of starch-based foods in relation to its water activity (aw). Journal of Stored Products Research, 36(1), 47-54. https://doi.org/10.1016/S0022-474X(99)00026-0.

[30] P. Sharma and H.S. Gujral, Antioxidant potential of wheat flour chapattis as affected by incorporating barley flour. LWT-Food Science Technology. 56 (1), 118–123, 2014. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.10.047.

[31] G. Panfili, A. Fratianni and M. Irano, Improved normal phase high-performance liquid chromatography procedure for determination of carotenoids in cereals. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 52 (21), 6373-6377, 2004. https://doi.org/10.1021/jf0402025.

[32] J. Jastrebova, M. Skoglund and L.H. Dimberg, Selective and sensitive LC-MS determination of avenanthramides in oats. Chromatographia, 63, 419-423, 2006. https://doi.org/10.1365/s10337-006-0769-y.

[33] USDA, National Nutrient Database for Standard Reference, release 22. [Internet] U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Nutrient Data Laboratory, Beltsville, MD, United States. 2009. http://www.ars.usda.gov/ba/bhnrc/ndl.

[34] M. Kweon, L. Slade and H Levine, Solvent retention capacity (SRC) testing of wheat flour: Principles and value in predicting flour functionality in different wheat-based food processes and in wheat breeding – a Review. Cereal Chemistry, 88 (6), 537–552, 2011. https:// doi.org/10.1094/CCHEM-07-11-0092.

[35] J. E. Bock, The structural evolution of water and gluten in refined and whole grain breads: a study of soft and hard wheat breads from postmixing to final product. Cereal Chemistry, 96 (3), 520–531, 2019. https://doi.org/10.1002/cche.10152.

[36] A. Skendi, C.G. Biliaderis, M. Papageorgiou and M.S. Izydorczyk, Effects of two barley β-glucan isolates on wheat flour dough and bread properties. Food Chemistry, 119 (3), 1159-1167. 2010; https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.08.030.

[37] C. A. Challacombe, K. Seetharaman and L.M. Duizer, Sensory characteristics and consumer acceptance of bread and cracker products made from red or white wheat. Journal of Food Science, 76 (5), 337-346, 2011. https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02200.x.

[38] L. Malcolmson, C. Lukie, K. Swallow, T. Sturzenegger and J. Han Using barley flour to formulate foods to meet health claims. Cereal Foods World, 59 (5), 235-242, 2014.DOI: 10.1094/CFW-59-5-0235.

[39] V. I. Polonsky, N. A. Surin, S. A. Gerasimov, A. G. Lipshin, A. V. Sumina and S. A. Zute, Evaluation of barley genotypes for the content of β-glucans in grain and other valuable features in Eastern Siberia. Proceedings on Applied Botany, Genetics, and Breeding, 182 (1), 48-58, 2021. https://doi.org/10.30901/2227-8834-2021-1-48-58.

[40] W. Liu, M. Brennan, L. Serventi and C. Brennan, Buckwheat flour inclusion in Chinese steamed bread: Potential reduction in glycemic response and effects on dough quality. European Food Research and Technology, 243, 727-734, 2017. https://doi.org/10.1007/s00217-016-2786-x.

[41] D. Sabanis, D. Lebesi and C. Tzia, Effect of dietary fiber enrichment on selected properties of gluten-free bread. LWT-Food Science and Technology, 42 (8), 1380-1389, 2009. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.03.010.

[42] J. Liu, β-Glucan effects on pasting properties and potential health benefits on flours from different oat lines. Graduate Theses and Dissertations, Iowa State University. USA, 2010.

[43] M. Blandino, M. Locatelli, A. Gazzola, J.D. Coisson, S. Giacosa, F. Travaglia, M. Bordiga, A. Reyneri, L. Rolle and M. Arlorio, Hull-less barley pearling fractions: Nutritional properties and their effect onthe functional and technological quality in bread-making. Journal of Cereal Science, 65, 48-56, 2015. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.06.004.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 1049-1058

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Malzeme ve madde akış analizi ile illerin katı atık yönetiminin döngüselliğinin incelenmesi: Düzce ili örneği

Assessment of waste management circularity in provinces by using material and substance flow analysis: A case study of Düzce province

Kadriye Elif Maçin[1,*]

[1] *İstanbul Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul Türkiye*

Öz

Bu çalışma, malzeme akış analizi (MAA) ile madde akış analizi (MDAA) kombinasyonunun illerde atık yönetimi ve döngüsellik değerlendirmesi için temel olarak nasıl kullanılabileceğini göstermeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda bir çerçeve sunulmuş ve Düzce ili katı atık yönetimi üzerine bir vaka çalışması gerçekleştirilmiştir. Döngüsellik hesabının yapılabilmesi için sunulan çerçevede belirtilen dört adım takip edilmelidir. Bunlar, (1) amaç ve kapsamın belirlenmesi; (2) MAA gibi kapsamlı bir çalışma için gerekli verilerin toplanması; (3) seçilen göstergeler aracılığıyla döngüselliğin hesaplanması ve (4) sonuçların değerlendirilmesidir. Vaka çalışmasının sonuçlarına göre, ambalaj atıklarının döngüsellik oranı %44.5 olarak tespit edilmiştir. Buna karşılık, Düzce'deki biyometanizasyon tesisinin döngüsellik oranı azot için %13.2 fosfor için ise %4.4 olarak belirlenmiştir. Önerilen çerçeve değerlendirildiğinde, döngüselliğin ötesine geçerek diğer hedef odaklı çalışmalara uygulanma potansiyeli taşımasına karşın özellikle ekonomik boyutlarda sınırlamalarının olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. MAA'nın belediye ölçeğinde kullanılması, atık yönetim kapasitesinin planlanmasını destekleyebilir ve bu sayede olası aşırı kapasitenin önlenmesini sağlayabilir.

Anahtar kelimeler: Döngüsellik, Katı atık yönetimi, Kütle dengesi, Malzeme akış analizi, Madde akış analizi.

Abstract

The study aims to show how the combination of material flow analysis (MFA) and substance flow analysis (SFA) can be used as a basis for circularity assessment in waste management systems. In this context, a framework has been presented and a case study focusing on solid waste management in Düzce province has been applied. According to the specified framework for circularity calculation, four specific steps must be followed. These are (1) defining the purpose and scope; (2) data collection for a comprehensive study like MFA; (3) calculating circularity with selected indicators; and (4) evaluating the results. The circularity of packaging waste is 44.5%, while the circularity of the biomethanization facility in Düzce was found 13.2% for nitrogen and 4.4% for phosphorus. Although the suggested framework can be applied to other studies beyond circularity, it has economic limitations. MFA results on a municipal scale can support waste management capacity planning and prevent overcapacity.

Keywords: Circularity, Solid waste management, Mass balance, Material flow analysis, Substance flow analysis.

1 Giriş

Dünya genelinde, doğal kaynakların tüketimi ve katı atık yönetimi (KAY) uygulamaları hakkında giderek artan bir endişe mevcuttur. Malzeme tüketiminin 2060 yılına kadar iki katına çıkması, atık üretiminin ise 2050 yılına kadar %70 oranında artması öngörülmektedir [1-2]. Dünya Bankası verilerine göre, dünyada evsel atık üretiminin 2050 yılında 3.4 milyar tona ulaşması beklenmektedir [3]. Şehirler bu atıkların oluşumunda ayrı bir önem taşımaktadır. Birleşmiş Milletler'e göre dünya nüfusunun %68'i 2050 yılına kadar şehirlerde yaşayacaktır [4]. Bu bağlamda, belediye katı atıklarının önlenmesi, yeniden kullanımı ve geri dönüştürülmesi, KAY politikasının öncelikleri arasında yer almaktadır.

Atık yönetimi ve geri dönüşüm faaliyetleri, kapsamlı ve entegre yaklaşımlar gerektiren karmaşık ve çok yönlü mekanizmalardır [5]. Bu nedenle, KAY sorunları halen tam anlamıyla çözülememiştir [6]. KAY ile doğrudan bağlantılı olan döngüsel ekonomi kavramı, rekabetçi ve iklim açısından nötr bir ekonomi oluşturma hedefiyle ortaya çıkmış ve giderek önemi artmıştır. Döngüsel ekonomiye geçiş, etkin ölçüm ve izleme araçlarını gerektirmektedir. Bu ekonomiyi temsil etmek amacıyla oluşturulan gösterge sistemi, her düzeydeki sistemlere ve çeşitli sektörlere uygulanabilir nitelikte olmalıdır. Döngüsel ekonomi ilkeleri giderek önem kazanmasına rağmen, mevcut çerçeveler, özellikle süreç düzeyinde döngüselliği değerlendirme konusunda sınırlı kalmaktadır. Mevcut modellerin çoğu, ürün düzeyindeki döngüselliğe veya makro düzeydeki sistemlere odaklanmaktadır, ancak bireysel süreçlerin kaynak akışlarını ve çevresel etkilerini tam olarak yansıtamamaktadır. Bu eksiklik, etkili karar alma süreçlerini

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: macin@itu.edu.tr (K. E. Maçin)
Geliş / Received: 08.01.2025 Kabul / Accepted: 04.06.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1615960

ve kaynakların verimli kullanımını engellemektedir. Son zamanlarda hem ülke seviyesinde UNI/TS 11820:2022 hem de uluslararası standart ISO 59020:2024 (Circular economy – Measuring and assessing circularity performance) [7] tarafından Malzeme Akış Analizi (MAA) ve Madde Akış Analizi (MDAA) döngüselliğin ölçülmesi için "tamamlayıcı bir yöntem" olarak kabul edilmiştir [8]. MAA ve MDAA, kütle dengesi ilkesine dayanmaktadır. Bu yöntemlerden elde edilen sonuçlar, atık yönetim sistemlerinin tasarımına yönelik kavramsal kararlar, atık yönetimi süreçlerinin iyileştirilmesi, maliyet-fayda optimizasyonları ve diğer çeşitli amaçlar için kullanılabilmektedir [9]. Son dönemdeki çalışmalarda, MAA ve MDAA'nın, ambalaj sektörü [10], alüminyum [11] ve süt ürünleri gibi tarımsal gıda sistemlerinde [12] döngüselliği değerlendirme konusundaki rolleri tartışılmıştır. Bu gelişme, aynı zamanda MAA'nın artan bir ilgiyle benimsenmesine katkı sağlamıştır [8].

KAY gibi karmaşık sistemlerin çözülebilmesi için, atık akışlarının mevcut ve gelecekteki durumu ile özellikleri, ayrıca arka plan sistemindeki değişiklikler dikkate alınarak dikkatli bir planlama yapılmalıdır. Böylece, olası hatalı kararlardan kaçınılmakta ve genel olarak en iyi çevresel sonuçlar güvence altına alınabilmektedir. MAA, bir KAY sisteminin stok ve akışlarını anlamaya yardımcı olmakta ve çevresel değerlendirme için doğal bir başlangıç noktası sunmaktadır [13]. MAA, özellikle hedefe yönelik KAY stratejilerinde, atık akışının oluşumundan kullanım ömrünün sonuna kadar izlenmesinde giderek daha fazla kullanılmaktadır [9,14-15].

MAA, gizli akışları ve maliyetleri göz önünde bulundurarak, atık yönetim sisteminin unsurlarını ve süreçlerini derinlemesine anlamak için bir yöntem sunmakta ve KAY performansını iyileştirme fırsatlarını belirlemeye olanak tanımaktadır [14]. MAA, geri dönüşüm oranı [16] gibi toplu göstergelerin ölçülmesi, karbon, besin maddeleri ve ağır metaller gibi temel maddelerin akıbetinin izlenmesi [17-18] ve enerji dengelerinin yapılması için KAY'da yaygın olarak uygulanmıştır. Ayrıca, kâğıt [19], alüminyum [20] ve gıda atıkları [21] gibi atık malzemelerin döngüselliğini araştırmaya yönelik geniş bir literatür bulunmaktadır.

Türkiye'de her yıl 30.3 milyon ton atık üretilmektedir [22]. Bu atıkların %13.5'i hâlâ çöplüklere gönderilirken, %85.9'u atık işleme tesislerine ulaştırılmaktadır [22]. Ülkenin hedefi ise, 2035 yılına kadar atık geri kazanım oranını %60 seviyesine çıkarmaktır. Türkiye, 2053 yılına kadar tüm atıklarını düzenli depolama tesislerinden (DDT) uzaklaştırmayı hedeflemektedir. Ayrıca, iklim değişikliğine uyum kapsamında sürdürülebilir gıda sistemi uygulamaları geliştirmeyi planlamakta ve döngüsel ekonominin hedeflerini de içeren bir 'Döngüsel Ekonomi Eylem Planı' hazırlamaktadır [23]. Türkiye'de, daha önce şehir ölçeğinde MAA [5] ya da daha küçük ölçekte (örneğin, bir üniversite kampüsü) MAA kullanılarak atık yönetiminin döngüselliğini ölçen çalışmalar gerçekleştirilmiştir [24-25]. Ancak, yazarın araştırmaları sırasında karşılaştığı kadarıyla, şehir ölçeğinde atık yönetimi ve döngüsellik arasındaki ilişkiyi ele alan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışma iki yönlü bir yenilik sunmaktadır. İlk olarak, küçük ve/veya orta ölçekli şehirlerin atık akışlarını tahmin etmeye olanak tanıyan bir MAA/MDAA modeli geliştirilmiştir. İkincisi, atıkların ve temel maddelerin (örneğin, Azot-N ve Fosfor-P) ayrıntılı bir döngüsellik analizi sağlanmaktadır. Sunulan çerçevenin daha iyi anlaşılabilmesi için Düzce İli'nin KAY döngüselliğine yönelik bir vaka çalışması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu makale, atık yönetiminde karar almada kullanılan yaygın parametrelere ek olarak, döngüselliğin önemini MAA ve MDAA yardımıyla ortaya koymaktadır.

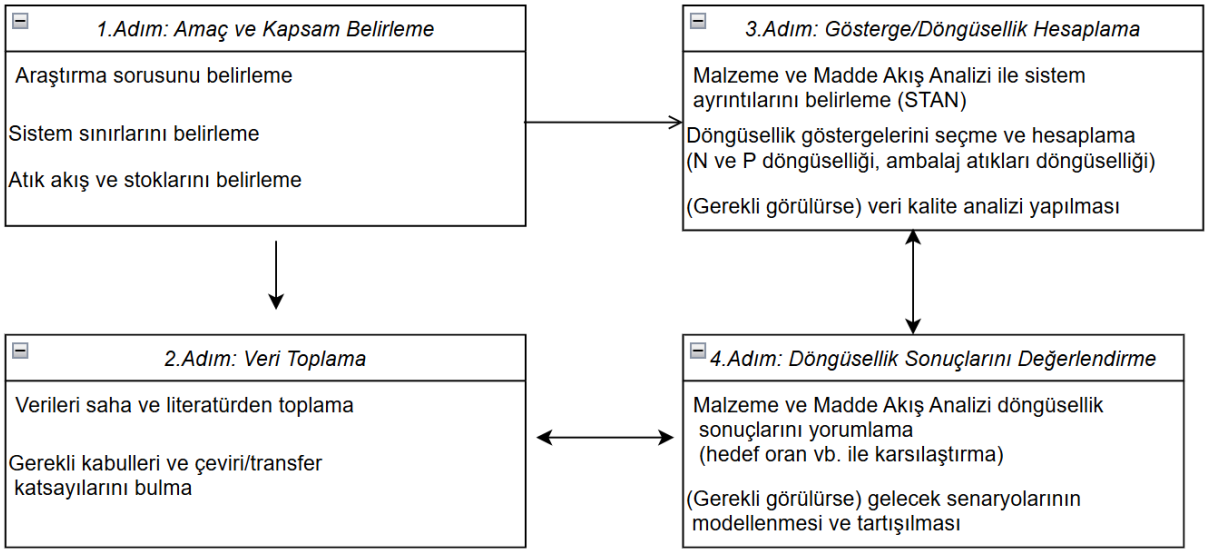
2 Materyal ve metot

2.1 Döngüsellik hesaplama çerçevesi

MAA, tanımlanmış mekansal ve zamansal sınırlar dahilinde, bir sistemdeki malzeme ve/veya maddelerin akışlarını ve stoklarını sistematik şekilde envanterini çıkarmak için kullanılan bir metodolojidir [26]. MAA ve MDAA, kütle korunumu yasasına dayanır; yani, girdilerin toplam miktarı, çıktılar ile stokların toplamına eşittir. Döngüsellik hesabı için bu çalışmada belirtilen çerçeveye göre dört belirli adım izlenmelidir. Bunlar (1) amaç ve kapsamın tanımlanması; (2) MAA gibi kapsamlı bir çalışma için veri toplama; (3) seçili göstergelerle döngüselliğin hesaplanması ve (4) sonuçların değerlendirilmesidir (Şekil 1). Birinci adım, amaç ve kapsam belirlenmeden önce mevcut KAY yapısının ayrıntılı bir şekilde incelenmesini içerir. Çalışmanın ilk adımı, kapsamın ve KAY mevzuatına uygunluğun doğrulanmasıyla tamamlanır ve mevcut KAY yapısının gözden geçirilmesini kapsar. Gerekli incelemelerin ardından, amaç, kapsam ve sistem sınırları tanımlanır. Ayrıca, MAA'da kullanılacak atık akışları ve stokları tasarlanır. İkinci adımda, veri toplama süreci detaylı şekilde yürütülür. Atık miktarının karakterizasyonu ve ildeki tesislere ait işletim verileri gibi kritik bilgiler, birincil ve ikincil veri kaynaklarından toplanır. Ayrıca, döngüsellik hesaplamalarında kullanılacak transfer/dönüşüm katsayıları, mümkünse doğrudan çalışma alanından, aksi takdirde literatür kaynaklarından elde edilir. Üçüncü adım, oluşturulan MAA modelinin ve döngüsellik göstergelerinin hesaplanması için temel bir rol oynar. Bu aşamada, kütlesel akışların ve stokların takibini Sankey diyagramları aracılığıyla gerçekleştirmeye olanak tanıyan STAN gibi yazılımlar kullanılmaktadır. Gerekli olduğu durumlarda, birincil ve ikincil veriler incelenerek sonuçlar üzerindeki belirsizliği değerlendirmek için veri kalite analizi gerçekleştirilebilir. Dördüncü adımda, KAY senaryoları tanımlanır ve MAA modeli, bu senaryoları değerlendirerek döngüsellik hedeflerine ulaşmak için gerekli düzenlemeleri belirlemede kullanılır. Son aşamada, sonuçlar değerlendirilir. Eğer ihtiyaç duyulursa, KAY için gelecek senaryolar tasarlanır ve sistem döngüselliği üzerindeki etkilerini değerlendirmek için göstergeler yeniden hesaplanır.

2.2 Düzce ili mevcut katı atık yönetimi- döngüsellik vaka çalışması

MAA ve MDAA ile katı atık yönetiminin döngüselliğini hesaplama yöntemi çerçevesi (Şekil 1), birinci adımda belirtilen araştırma sorusunun tanımlanmasıyla başlar.

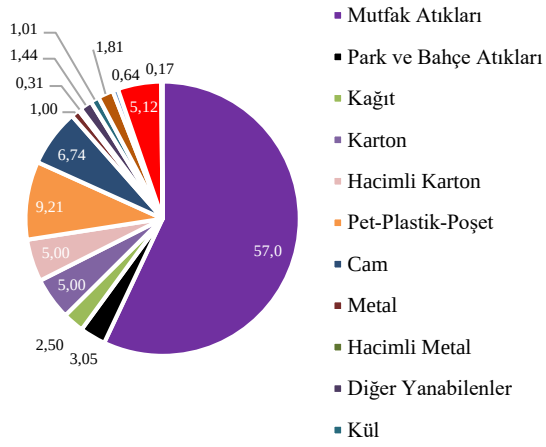


Şekil 1. MAA ve MDAA ile katı atık yönetiminin döngüselliğini hesaplama çerçevesi

Bu vaka çalışmasında, Düzce ili katı atık yönetiminin azot, fosfor ve ambalaj atıklarının döngüselliğini hesaplamak amacıyla MAA ve MDAA yöntemlerinin kullanılması kararlaştırılmıştır. Bu kapsamda, sistem sınırları 2023 yılında Düzce il sınırları içinde yer alan ilçelerde üretilen belediye atıkları olarak belirlenmiştir [27]. Atık karakterizasyonu (Şekil 2) için Düzce İli Çevre Durum Raporu'ndan [28], azot ve fosfor miktarlarının tespiti için ise diğer literatür kaynaklarından (Tablo 1) yararlanılmıştır [29]. Birinci adım kapsamında, DDT ve Düzce il sınırları içinde yer alan biyometanizasyon tesisinin fermantasyon çıkışı katı-faz ürünü sistemin stokları olarak kabul edilmiştir. MAA ve MDAA yöntemlerinin detayları, 2.1.2 ve 2.1.3 başlıklarında sunulmuştur.

Düzce ili Türkiye'de Batı Karadeniz bölgesinde bulunmaktadır. Düzce'nin doğusunda Bolu, batı ve kuzeydoğusunda, sırasıyla, Sakarya ve Zonguldak bulunmaktadır. Düzce merkez, Akçakoca, Cumayeri, Çilimli, Gölyaka, Gümüşova, Kaynaşlı ve Yığılca olmak üzere 8 ilçesi bulunmaktadır. Düzce ilinin alanı 2492 km^2'dir. Düzce 1999 yılından bu yana il konumundadır.

1997 yılından 2008 yılının Temmuz ayına kadar, Düzce Merkez İlçe'de toplanan katı atıkların tamamı Çamköy'de vahşi depolama yöntemiyle bertaraf edilmiştir. Ancak, bu tarihten sonra İSKİ ve İBB, İSTAÇ yönetiminde gerçekleştirilen Rehabilitasyon Projesi kapsamında, bu alan tamamen kullanıma kapatılmıştır. ÇED olumlu raporunun alınması, olağan süreçten uzun sürdüğünden Cumayeri, Gölyaka, Gümüşova, Kaynaşlı, Yoncalık ve Yığılca İlçelerinde ise düzensiz depolama devam etmiştir [27]. 2014 yılı sonunda Yığılca'da yeni katı atık yönetim tesisi açılmıştır. Tesis 309.000 m^2'lik bir arazi üzerine inşa edilmiştir. Türkiye'de 2035 yılına kadar toplanacak atıkların %60'ının geri dönüştürülmesi hedeflenmektedir. Bu doğrultuda, Düzce İli'nde 2020 yılından itibaren atıkların geri kazanım oranlarının aşamalı olarak artırılması ve 2035 yılında %60 geri kazanım oranına ulaşılması planlanmıştır. Biyobozunur atıklar (mutfak atıkları ve park-bahçe atıkları), biyometanizasyon tesisine alınarak fermantasyon işlemine tabi tutulmakta ve elde edilen biyogazdan elektrik üretim tesisinde hem ısı hem de elektrik enerjisi elde edilmektedir. Isı biyometanizasyon tesisinde kullanılmakta, elektrik ise enterkonnekte sisteme verilmektedir.



Şekil 2. Düzce ili atık karakterizasyonu [28]

Sıvı fermente ürünün %50'si, geri dönüşüm sistemi aracılığıyla biyobozunur atıkların fermantasyon işleminde kullanılmaktadır [30]. Biyometanizasyon tesisinde fermantasyon sırasında oluşan %20-25 oranındaki katı fermente ürün, ilgili mevzuat gerekliliklerini karşıladığı takdirde tarımda veya park-bahçe uygulamalarında değerlendirilmektedir. Aksi durumda, 'Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik' [31] hükümlerine uygun şekilde yönetilmektedir. Düzce ili için ayrıca Atıktan Türetilmiş Yakıt Tesisi (ATY) planlanmakta olup, bu tesis mevcut olmadığı için sistem sınırlarına dâhil edilmemiştir.

Tablo 1. Atık malzemelerin fiziko-kimyasal özellikleri, kuru ağırlık [29].

Bileşen	N (mg/kg atık)	P (mg/kg atık)
Mutfak Atıkları	2336	284
Kağıt	12.8	0.5
Karton	47.8	2.3
Hacimli Karton	55.9	6.5
Plastik	14.7	4
Park ve Bahçe	442.5	58.4
Tehlikeli atıklar	555.9	37.6
Cam	0	0.8
Metal	0	6.9
Hacimli Metal	0	4.6
Kül	0	0
Diğer Yanmayanlar	0	0,8
AEEE*	2.7	0
Diğer	253.8	34.9
Diğer Yanabilenler	125	7

* AEEE: Atık Elektrik ve Elektronik Ekipman

2.2.1 *Maddelerinin döngüselliğinin hesaplanması-azot ve fosfor*

Bu bölümde, MAA ve MDAA ile katı atık yönetiminin döngüselliği hesaplama yöntemi çerçevesinde (Şekil 1) belirtilen ikinci ve üçüncü adımlar uygulanmıştır.

MAA üç ana unsurdan oluşur: sistem, süreç ve akış [15,31]. Tanımlanmış bir sistemdeki süreçler içindeki ve arasındaki malzeme akışlarını gösteren MAA, bu çalışmada STAN 2.7 yazılımı kullanılarak uygulanmıştır [32]. Çıktı hesaplamaları ise kütle dönüştürme ilkesine dayanmıştır (Denklem 1).

Depolama sahası ve arazide kullanım süreçleri, sistemin stokları olarak kabul edilirken, sisteme giren ve çıkan malzemeler, sistemin dışındaki diğer süreçler için sırasıyla (I) ve (E) harfleriyle temsil edilmiştir. Şehirdeki atıklar, toplanma, taşınma ve bertaraf yöntemlerine göre; diğerleri, park-bahçe atıkları, ambalaj-cam atıkları ve mutfak atıkları olmak üzere kategorilere ayrılmıştır.

Şekil 2'de karakterizasyonu yapılan atıklar, MAA kapsamında dört grup altında sınıflandırılmıştır. DDT, atık yönetim sisteminde uzun vadeli stok olarak tanımlanmakta olup, bu modelde arazide/toprakta depolanan stokları ifade etmektedir. Bu çalışmanın amacı, farklı atık yönetim sistemlerinin katı atık akışları ve dönüşümleri üzerindeki etkilerini analiz etmek olduğundan, yakıt veya yardımcı malzemeler gibi diğer hiçbir 'akış' kütle dengesine dahil edilmemiştir.

$$\sum_{i=1}^{i=k}\left(\dot{m}_{giriş,i}\right) = \sum_{m=1}^{m=n}\left(\dot{m}_{çıkış,m} + \dot{m}_{stok,.}\right) \quad (1)$$

Burada ṁ(giriş,i) bir işleme giren girdi akışlarını temsil ederken, ṁ_(çıkış,m) atık miktarını temsil etmektedir. Tüm girdilerin, çıktıların ve stokların kütle dengesine dayanan yaklaşım, malzemelere veya maddelere, örneğin ambalaj atıkları gibi gibi atık fraksiyonlarına veya P gibi kaynaklara uygulanmıştır.

MDAA, çeşitli bağlamlar ve ölçeklerde madde veya element akışlarını ve stoklarını ölçmek için kullanılan kapsamlı bir yöntemdir. Besin döngülerinin değerlendirilmesi ve modellenmesi açısından MDAA yöntemleri kritik öneme sahiptir [33]. Döngüselliğinin hesaplanması için Denklem 2 kullanılmıştır.

$$\textbf{\textit{N veya P Döngüselliği}}\ (\%) = \frac{(\text{N veya P alımı} + \text{Toprakta Depolanan})(\text{ton/yıl})}{\text{Atık İçindeki Toplam N veya P Miktarı (ton/yıl)}}\, x\ 100 \quad (2)$$

Toprağa uygulanana yani biyometanizasyon tesisinde oluşan fermentasyon katı-faz ürününün akıbeti için litetatür kaynaklar [34-35] kullanılmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. Araziye uygulanan katı faz fermentasyon ürününün N ve P'nin dağılımı (%) [34-35].

N -alımı	Sızıntı NO_3	N_2O emisyonu	Toprakta depolanan N
52.93	41.36	0.96	4.74
P -alımı	Sızıntı P	Depolanan P	
19.28	56.23	24.48	

2.2.2 *Geri dönüşüm atıklarının döngüselliğinin hesaplanması*

Ambalaj atıklarının döngüselliğinin hesaplanmasında, Azot-N ve Fosfor-P döngüselliğinde olduğu gibi, MAA ve MDAA ile katı atık yönetiminin döngüselliği hesaplama yöntemi çerçevesinde (Şekil 1) belirtilen ikinci ve üçüncü adımlar uygulanmıştır. Çerçevenin üçüncü aşamasında, durumu değerlendirmek için Denklem 3-4-5 kullanılmıştır.

Geri dönüşüm oranı, KAY raporlamalarında, hedef belirleme süreçlerinde ve izlemelerde yaygın olarak kullanılan popüler bir göstergedir. Bu nedenle hesaplamalara dahil edilmiştir (Denklem 4). Ancak tesislerin %100 verimle çalışması mümkün değildir (Tablo 3). Ayrıştırma oranı sayesinde, tesislerin ayırma verimliliği hesaplanabilir (Denklem 5). Ambalaj atıkları döngüselliği, geri dönüşüm sürecindeki kayıpları ve ikincil ürünlerin pazar ikame oranlarını (Tablo 4) dikkate alarak, hammaddeyi ikame eden ürünleri etkili bir şekilde hesaba katar. Bu yaklaşım, gerçek geri dönüşüm oranını daha doğru bir şekilde temsil etmektedir (Denklem 6).

$$\textbf{\textit{Geri dönüşüm oranı}}\ (\%) * = \frac{\text{İkincil Ürün Üretiminde Kullanılan Miktar (ton/yıl)}}{\text{Geri Dönüşüm Tesisine Giren Atık Miktarı (ton/yıl)}}\, x\ 100 \quad (3)$$

$$\textbf{\textit{Ayrıştırma Oranı}}\ (\%) * = \frac{\text{Geri Dönüşüm Tesisine Giren Atık Miktarı (ton/yıl)}}{\text{Üretilen Atık Miktarı } \left(\frac{\text{ton}}{\text{yıl}}\right) **}\, x\ 100 \quad (4)$$

$$\textbf{\textit{Ambalaj Atıkları Döngüselliği}}\ (\%) * = \frac{\text{İkincil Ürün Üretiminde Kullanılan Miktar (ton/yıl)}}{\text{Üretilen Atık Miktarı } \left(\frac{\text{ton}}{\text{yıl}}\right) **}\, x\ 100 \quad (5)$$

*Ambalaj atıkları döngüselliği hesaplanırken "cam" bileşeni hesaplara dâhil edilmiştir

**Bu vaka çalışmasında üretilen tüm atıkların toplandığı kabul edilmiştir.

Tablo 3. Maddesel geri kazanım tesislerinin geri kazanım verimlilikleri (%) [36].

Bileşen	Cam	Al	Kağıt	Karton	Plastik
Aluminyum	0	97	0	0	0
Kağıt	0	0	77	0	0
Karton	0	0	0	54	0
Plastik	0	0	0	0	98
Cam	95	0	0	0	0

Tablo 4. Maddesel geri kazanım tesislerinin geri kazanım verimlilikleri (%) [36].

Pazar ikame faktörü	Değer	Kaynak
Plastik	0.85	[37].
Kağıt	0.85	[37].
Karton	1	[38].
Cam	0.83	[37].
Fe olmayan metal	0.85	[37].
Fe metal	0.7	[39].
Aluminyum	1	[37].

2.2.3 Veri kalite analizi

Veri kalite analizi sırasında, Weidema ve Wesnæs'in (1996) yöntemi ile JRC'nin (2011) veri sınıflandırma yöntemleri kullanılarak, öncelikle veri kalite seviyesi (VKS) Denklem 6'ya göre hesaplanmıştır [41-42].

$$VKS = \frac{G + E + Z + C + T + Xw * 4}{i + 4} \quad (6)$$

Denklem 6'da G güvenilirliği, E eksiksizliği (veya tamlığı), Z zamansal ilişkiyi, C coğrafi ilişkiyi ve T teknolojik ilişkiyi temsil eder. Xw, veri kalitesi göstergeleri arasındaki en yüksek sayısal değere karşılık gelen en düşük kalite seviyesini ifade eder. i ise, veri kalitesi göstergelerinin toplam sayısını belirtmektedir [41-42]. Denklem 6 kullanılarak VKS hesaplandıktan sonra, her bir verinin kalite sınıflandırması Tablo 5 baz alınarak yapılmıştır. VKS değeri 1.6'nın altında olduğunda veri yüksek kaliteye sahiptir. 1.6 ile 3 arasında ise orta kaliteye sahip kabul edilir. Değer 3 ile 4 arasında olduğunda, bu tahmini veri olarak değerlendirilir.

Tablo 5. Veri kalite seviyesi [42]

Genel veri kalitesi derecesi	Genel veri kalite sınıfı	Temsil edici renk
< 1.6	Yüksek kalite veri	
>1.6 - 3	Orta kalite veri	
>3-4	Tahmini veri	

3 Bulgular ve tartışma

Bu bölümde, materyal ve metot bölümündeki sıralamadan farklı bir yaklaşım izlenerek, öncelikle vaka çalışması bulguları sunulacak, ardından önerilen çerçevenin avantajları ve dezavantajları tartışılacaktır.

3.1 Vaka çalışması bulguları

Bu bölümde, Düzce için gerçekleştirilen MAA/MDAA çalışmasının sonuçlarının ayrıntıları (üçüncü adım) sunulacak ve ardından bu sonuçların değerlendirilmesi yapılacaktır (dördüncü adım).

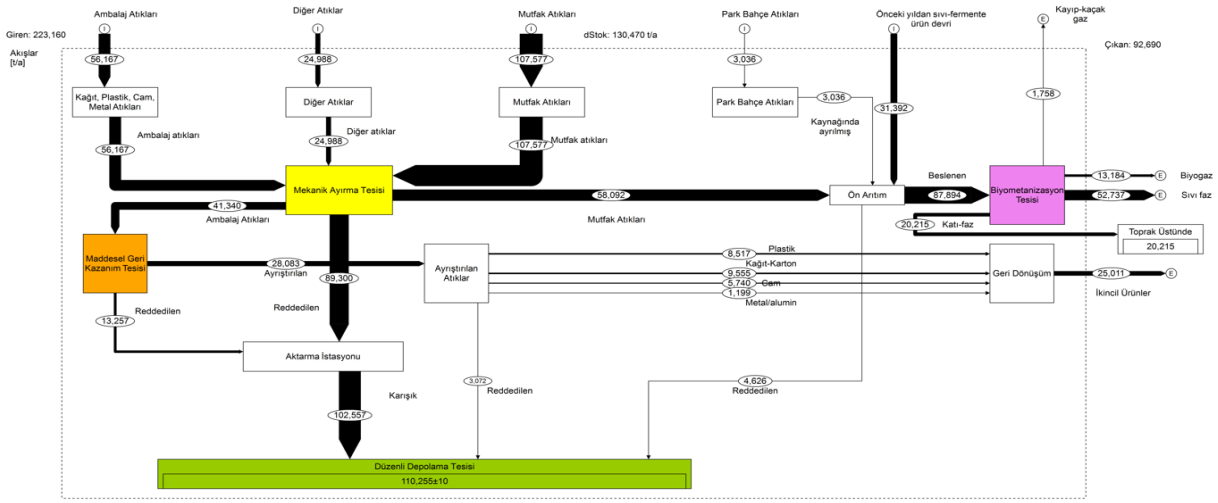
Ambalaj atıkları için geri dönüşüm oranı (%60.5) ve ayrıştırma oranı (%73.6) incelendiğinde, 2023 yılı itibarıyla, 2035 yılı için hedeflenen %60 geri kazanım oranının sağlandığı görülmektedir (Şekil 3). Ancak, ambalaj atıkları döngüselliği incelendiğinde (%44.5), 2023 yılı itibarıyla Düzce ambalaj atıklarının bu hedefin altında kaldığı görülmektedir. Bu durum, atık yönetiminde performans ölçümünde yalnızca tesislere giren atık miktarlarına bakılmasının (bkz. Denklem 1: $\dot{m}_{(giriş,i)}$) yeterli olmadığını göstermektedir. Düzce'de bulunan maddesel geri kazanım tesisine ilişkin özel performans verileri bulunmadığından, hesaplamalar Tablo 3'e dayanarak gerçekleştirilmiştir. Bu da sonuçlarda bir belirsizlik yaratabilir. Tesise dair performans ve verim bilgileri elde edildiği takdirde, hesaplamaların yeniden yapılması faydalı olacaktır.

$$\textbf{Geri dönüşüm oranı}\ (\%) = \frac{25011(\text{ton/yıl})}{41430\ (\text{ton/yıl})} x\ 100 = \%60.5$$

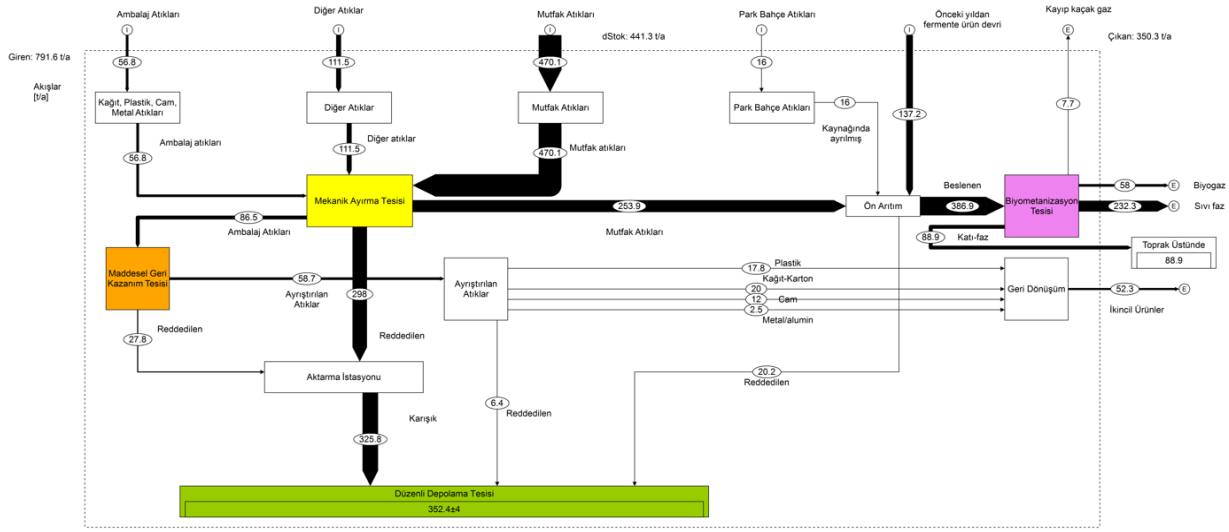
$$\textbf{Ayrıştırma Oranı}\ (\%) = \frac{41430(\text{ton/yıl})}{56167\ (\text{ton/yıl})} x\ 100 = \%73.6$$

$$\textbf{Ambalaj Atıkları Döngüselliği}\ (\%) = \frac{25011(\text{ton/yıl})}{56167\ (\text{ton/yıl})} x\ 100 = \%44.5$$

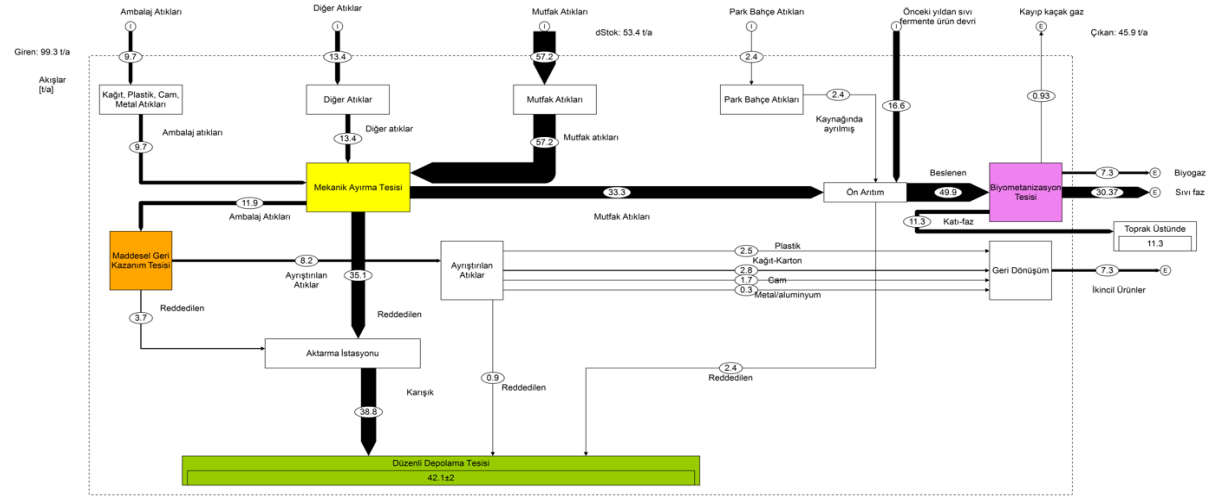
Geri dönüşüm süreçlerindeki teknolojik gelişmeler, verimliliği artırarak daha yüksek kalitede geri dönüştürülmüş malzemeler elde edilmesini sağlamaktadır. Ancak, ambalaj atık akışlarındaki kirlenme ve geri dönüştürülmüş ambalaj malzemeleri (ikincil ürünler) için pazarların mevcut olup olmaması gibi çeşitli zorlukların da ele alınması gerekmektedir. Vaka çalışmasında, döngüsellik hesaplamalarında maddesel geri kazanım tesis verimlilikleri (Tablo 3) ve ikincil ürün pazar ikame oranları (Tablo 4) dikkate alınarak bu sorunlar kısmen çözülmeye çalışılmıştır. Ayrıca, gerçek hayatta bu zorlukların üstesinden gelebilmek için çeşitli iyileştirmeler yapılması mümkündür.



Şekil 3. Düzce ili 2023 yılı katı atık yönetimi –malzeme akış analizi (ton/yıl)



Şekil 4. Düzce ili 2023 yılı katı atık yönetimi –madde akış analizi-azot (ton/yıl)



Şekil 5. Düzce ili 2023 yılı katı atık yönetimi –madde akış analizi-fosfor (ton/yıl)

Ambalaj geri dönüşüm süreçlerini iyileştirmek için araştırma ve geliştirme faaliyetleri, geri dönüşüm altyapısının genişletilmesi, geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımını teşvik eden politikaların uygulanması, kamu alımlarında geri dönüştürülmüş içerik kriterlerinin benimsenmesi ve tüketicilerin atık yönetimi konusunda bilinçlendirilmesi gibi adımlar, geri dönüşüm süreçlerindeki zorlukların üstesinden gelmeye katkı sağlayabilir.

$$\textit{Düzce İli Atık Yönetim Sisteminin N Döngüselliği}\ (\%) = \frac{(47.05 + 4.21)(\text{ton/yıl})}{791.6\ (\text{ton/yıl})} x\ 100 = \%6.5$$

$$\textit{Biyometanizasyon Tesisinin N Döngüselliği}\ (\%) = \frac{(47.05 + 4.21)(\text{ton/yıl})}{386.9\ (\text{ton/yıl})} x\ 100 = \%13.2$$

$$\textit{Düzce İli Atık Yönetim Sisteminin P Döngüselliği}\ (\%) = \frac{2.19\ (\text{ton/yıl})}{99.3\ (\text{ton/yıl})} x\ 100 = \%2.2$$

$$\textit{Biyometanizasyon Tesisinin P Döngüselliği}\ (\%) = \frac{2.19\ (\text{ton/yıl})}{49.9\ (\text{ton/yıl})} x\ 100 = \%4.4$$

Literatürde, evsel atıklara yönelik yapılan MAA çalışmalarında döngüsellik veya performans hesaplamalarına ilişkin Denklem 3, 4 ve 5'teki ayrımlara genellikle rastlanmadığı görülmektedir. Nottingham'da evsel atıklarla ilgili gerçekleştirilen MAA çalışmasına göre, 2017 yılında 37.717 ton ambalaj atığı üretilmiş ve bunun 16.067 tonu (%43'ü) geri dönüştürülmüştür [43]. Bu değer, Düzce'deki oran (%73) ile karşılaştırıldığında daha düşüktür; bunun nedeni, Nottingham'da atıkların önemli bir kısmının geri kazanıma gönderilmesidir. Avusturya'da 2020 yılı belediye katı atık verileri kullanılarak gerçekleştirilen MAA çalışmasına göre, cam atık miktarı 311.500 ton, kâğıt atık miktarı 615.400 ton ve plastik atık miktarı 299.000 ton olarak hesaplanmıştır. Ambalaj atıklarının geri dönüşüm oranları ayrı ayrı değerlendirilmiş ve plastik atıklar (%25) hariç, kâğıt (%80) ve cam (%82) döngüsellik oranları Düzce'nin döngüsellik oranından (%73) daha yüksek bulunmuştur [44]. Üç farklı ülkeden elde edilen sonuçlar, bölgelere özgü döngüselliğin ve MAA çalışmalarının önemini açıkça ortaya koymaktadır. Türkiye'de, şehir ölçeğinde daha önce yalnızca Ankara için bir MAA çalışması gerçekleştirilmiştir [5]; ancak ambalaj atıkları döngüselliği mevcut verilerle hesaplanamamıştır.

Düzce ilindeki katı atıklarda yıllık 791.6 ton azot ve 99.3 ton fosfor bulunduğu belirlenmiştir; biyometanizasyon tesisinin döngüsel dönüşüm oranları ise azot için %13.2, fosfor için %4.4 olarak hesaplanmıştır (Şekil 4-5). Azot (N) ve fosfor (P) döngüselliğinin karmaşık yapısına daha önce değinilmiş ve bu durumun, bu besin maddelerinin çevriminde çeşitli faktörlerin etkili olduğu gerçeğiyle ilişkili olduğu vurgulanmıştır [23,40]. Atıkların biyometanizasyon tesisi, kompostlaştırma gibi yöntemlerle değerlendirilmesi yerine DTT ve vahşi depolama yöntemlerine gönderilmesi, besin döngüsünü ciddi şekilde engellemektedir. Vaka çalışmasının sonuçlarında da görüldüğü üzere, toprak üstü uygulamalar yerine DDT'ye yönlendirmesi durumunda "N" ve "P" geri dönüşümü mümkün olmamaktadır. Buna benzer olarak, Türkiye'deki bir üniversite kampüsünde gıda atıklarının yönetimine ilişkin yapılan çalışmada, "N" ve "P" döngüselliğini sağlama açısından biyometanizasyon tesisinin, en verimli, DDT'nin ise en verimsiz yöntem olduğu tespit edilmiştir [24]. Sürdürülebilir KAY'a ulaşmak için, döngüyü kapatan kademeli geri dönüşüm ve geri kazanım süreçlerinin uygulanması gereklidir. Kademeli sistemlerin (cascading) tam potansiyelini ortaya çıkarmak, döngüsellik odaklı stratejilerin KAY üzerindeki etkilerini daha iyi anlamamıza katkı sağlayacaktır. [23].

Veri kalite analizi sonuçlarına göre (Tablo 6), vaka çalışmasında çoğunlukla orta kalitede veriler tercih edilmiştir. Atık miktarı ve karakterizasyonunda yüksek kaliteli birincil verilerin kullanılması bir avantaj olarak değerlendirilebilir. Ancak, N ve P döngüsellik hesaplarında kullanılan atığın fiziko-kimyasal özelliklerine dair ikincil verilere dayanılması ve bu verilerin orta kalitede olması bir dezavantajdır. Veri kalite analizi, çalışmada herhangi bir tahmini veri kullanılmadığını kanıtlayan önemli bir sonuç ortaya koymuştur. İleride çalışmanın yüksek kaliteli verilerle tekrarlanması önerilmektedir.

Tablo 6. Veri kalite analizi sonuçları

Veriler	Veri Kaynağı	Güvenilirlik (G)	Eksiksizlik (E)	Zamansal İlişki (Z)	Coğrafi İlişki (C)	Teknolojik İlişki (T)	Veri Kalite Skoru	Veri Kalite Sınıfı
Atık miktarı	birincil	1	1	1	1	1	**1.0**	Yüksek kalite
Atık karakterizasyonu	birincil	1	1	1	1	1	**1.0**	Yüksek kalite
Atık fiziko-kimyasal özellikleri	ikincil	1	1	3	3	2	**2.4**	Orta kalite
Maddesel geri kazanım tesislerinin geri kazanım verimlilikleri	ikincil	1	1	3	3	2	**2.4**	Orta kalite
Arazi uygulamaları-N-P	ikincil	1	1	3	3	2	**2.4**	Orta kalite
Biyometanizasyon tesisi-fermantasyon ürün oranları	birincil	2	2	1	1	1	**1.6**	Yüksek kalite

Bu çalışmanın amacı, Şekil 1'de sunulan metodolojiyi tanıtmak ve vaka çalışması üzerinden açıklamalar yapmak olduğu için gelecek senaryoları oluşturulmamıştır (bkz. dördüncü adım). Ancak, ATY tesisinin kurulması ve Düzce'de gelecekte öngörülen atıkların döngüselliğini etkileyebilecek diğer atık yönetim senaryoları, MAA kullanılarak modellenebilir. Örneğin, bu çalışma, Türkiye'nin 2053 yılına kadar %100 DDT'den uzaklaşma

hedefini kapsamamaktadır. Bunun için yakma tesisi gibi büyük ölçekli yatırımlar gereklidir. Bundan sonraki çalışmalar, bu tesislerin fizibilite, tekno-ekonomik analiz, döngüsellik ve yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) gibi bütüncül yaklaşımlara odaklanabilir. MAA'nın, YDD gibi bir çevresel değerlendirme yöntemi ile birleştirilmesi, alternatif atık yönetimi teknolojilerini ve senaryolarını karşılaştırmak ve daha sonra hem stratejik hem de operasyonel düzeylerde atık yönetimi kararlarını desteklemek için önemli bir yöntem olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, vaka çalışmasında üretilen ve toplanan atık miktarlarının eşit olduğu varsayılmıştır. Pakistan'ın Karaçi şehrinde gerçekleştirilen MAA çalışması, kayıt dışı atık toplama oranının %25 olduğunu ortaya koymuştur [45]. Türkiye'de bu denli yüksek oranlar geçerli olmasa da, sonuçlarda önemli hassasiyet yaratabileceği öngörülen bu durumun, daha ayrıntılı verilerin elde edilmesiyle daha detaylı analiz edilmesine imkan sağlayacağı bilinmektedir. Bu veriler ışığında, mevcut durumun döngüsellik hesaplarının yapılması ve istenirse gelecekteki farklı atık toplama oranı performanslarının değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

3.2 Çerçevenin tartışılması

MAA, atık yönetim sistemlerinin planlanması ve tasarlanması açısından kritik bir araçtır; çünkü atık girdilerini, ürünleri ve stokları birbiriyle ilişkilendirerek gerekli tesis kapasitelerini ve diğer akışları hesaplamayı mümkün kılar. Ayrıca, toplu akış yaklaşımları, bir atık yönetim sisteminde yapılan değişikliklerin çeşitli unsurlar üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde ortaya koyar. Bu kapsamda oluşturulan çerçeveye uygun olarak bir vaka çalışması gerçekleştirilmiş ve bu süreçte hem malzemelerin hem de maddelerin takip edilmesi gerektiği belirlenmiştir. Ancak, vaka çalışması sonuçlarına göre önerilen çerçevenin bazı avantajları ve dezavantajları tespit edilmiştir; bu bölümde ise söz konusu avantajlar ve dezavantajlar detaylı bir şekilde ele alınacaktır.

3.2.1 Avantajlar

İllerdeki atık akışlarını takip etmek için tek bir standart yöntem bulunmamaktadır. Bu sebeple, KAY sistemi için veri yapısı, sıfırdan geliştirilmiş bir çerçeve temel alınarak oluşturulmuştur. Bu çerçeve, şehirler ve yerel yönetimler için kurumsal bir veri yapısının temel çizgisini oluşturmayı hedeflemektedir. Çerçevenin ana amacı ise KAY'ın döngüselliğini ölçmek ve analiz etmektir. Ancak diğer gösterge ve hedefler için de esnektir. Ayrıca sınırlar şehir ölçeği için çizilmiş olsa da farklı ölçekler için uygulanabilir. İyi bilinen ve genel kabul görmüş yöntemlere dayanan çerçevenin yapısı, yerel yönetimlerin KAY politikası, düzenlemeleri ve stratejisini birleştirmesine olanak tanıyarak döngüsellik hedefine ulaşılmasına katkıda bulunacaktır. Çerçevenin adımları takip edildiğinde, çalışmanın sonuçları hem malzeme hem de madde düzeyinde kütle dengesi yaklaşımının faydalarını ortaya koyacaktır. Bu kapsamda, girdiler, çıktılar ve stoklar dengelenecek; veri tutarlılığı sağlanacak; sonuçlar, bilinen belirsizliklerle yeniden üretilebilecek; ayrıca MAA, araştırmacılar ve dış paydaşlar için şeffaf ve açık bir bilgi paylaşım platformu sunacaktır.

3.2.2 Dezavantajlar

Birinci adımda amaç, kapsam ve sistem sınırlarının belirlenmesinin ardından, ikinci adımda veri toplama süreci oldukça zaman alıcıdır. Bu aşamada, yeterli verilerin temin edilebilmesi için uzman bir çalışma ekibinin oluşturulması gereklidir. Bu durum, hem zaman yönetimi hem de ekonomik kaynakların etkin bir şekilde planlanmasını zorunlu kılmaktadır. Hem ambalaj atıkları hem de azot ve fosfor döngüsellik hesaplarında kullanılan denklemler, MAA ve MDAA'nın doğası gereği yalnızca kütle dengesine dayanmaktadır. Bu durum, döngüsel ekonominin önemli bir unsuru olan finansal akışların bu çerçevede yer almadığını göstermektedir. Gelecek çalışmalarda, ekonomik akış parametreleri ile birlikte atık ithalat ve ihracatın etkilerinin de dikkate alınarak kapsamın genişletilmesi faydalı olacaktır.

4 Sonuçlar

Bu çalışma, şehir ölçeğinde KAY döngüselliğini tespit ederken karşılaşılabilecek zorlukları ele almak üzere bir MAA/MDAA çerçevesi önermektedir.

Çalışma kapsamında yürütülen vaka çalışması sonuçlarına göre Türkiye'de 2035 yılı için hedeflenen %60 geri kazanım oranı Düzce'de 2023 yılında sağlamaktadır. Ancak, döngüsellik oranının daha düşük (%44.5) olduğu tespit edilmiştir.

Düzce ilindeki katı atıkların içerdiği azot miktarı yıllık 791.6 ton, fosfor miktarı ise yıllık 99.3 ton olarak hesaplanmıştır. İl sınırlarında bulunan biyometanizasyon tesisinin döngüsellik oranı azot için %13.2, fosfor için ise %4.4 olarak belirlenmiştir.

Çerçeve, döngüseliğin ötesinde farklı hedef odaklı çalışmalara uygulanma potansiyeli taşısa da, özellikle ekonomik boyutlar açısından bazı sınırlamalara sahiptir. Gelecekteki çalışmalar, yaşam döngüsü maliyet unsurlarını çerçeveye entegre etmeye odaklanarak bu sorunu ele alabilir.

Ayrıca, veri toplama süreçlerinin diğer KAY çalışmalarına kıyasla daha zaman alıcı olduğu göz ardı edilmemelidir. Gelecekteki vaka çalışmaları, bu metodolojiyi doğrulama ve geliştirme fırsatları sunabilir.

Bu çalışma, gelecekteki atık senaryolarında MAA/MDAA uygulamalarının genişletilmesine de katkı sağlamaktadır. Ayrıca, belediye ölçeğinde MAA'dan elde edilen sonuçlar, yönetim kapasitesinin planlanmasını destekleyerek aşırı kapasitenin önlenmesini sağlayabilmektedir.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 9

Kaynaklar

[1] OECD, Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences, 2019.
[2] European Comission, A New Circular Economy Action Plan for a Cleaner and More Competitive Europe, 2020.
[3] S. Kaza, L. Yao, P. Bhada-Tata, F. Van Woerden, What a Waste 2.0 - A Global Snapshot of Solid Waste

Management to 2050, Urban Development Series Knowledge Papers, World Bank, Washington, DC, 2018.https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317.

[4] Birleşmiş Milletler, 68% of the world population projected to live in urban areas by 2050. https://www.un.org/development/desa/en/news/. (Erişim Tarihi: 12.08.2024)

[5] N. Aydın, Materials flow analysis as a tool to ımprove solid waste management: A case of Ankara. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 6(1), 90-97, 2020. https://doi.org/10.21324/dacd.467179

[6] A. U. Zaman, Identification of key assessment indicators of the zero waste management systems. Ecological Indicators. 36, 682–693, 2014. doi:10.1016/j.ecolind.2013.09.024

[7] ISO 59020:2024. Circular economy – Measuring and assessing circularity performance. Geneva: International Organization for Standardization, 2024.

[8] C. Bux, J. Fellner, D. Seyhan, and V. Amicarelli, Measurement of fertilizer flows to advance circularity and resilience to climate change. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 50, 100971, 2024. https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2024.100971

[9] N. Stanisavljevic, P. H. Brunner, Combination of material flow analysis and substance flow analysis: A powerful approach for decision support in waste management, Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy, 32(8), 733–744,2014. https://doi.org/10.1177/0734242X14543552.

[10] M. Lombardi, R. Rana, J. Fellner, Material flow analysis and sustainability of the Italian plastic packaging management, Journal of Cleaner Production, 287:125573, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125573.

[11] H. Buchner, D. Laner, H. Rechberger, J. Fellner, Material flowanalysis as basis for efficient resource management – the case of aluminium flows in Austria. Metallurgical Research & Technology,111:351–357, 2014. https://doi.org/10.1051/metal/2014040.

[12] R. Rebolledo-Leiva, L. Vásquez-Ibarra, E. Entrena-Barbero, M. Fernández, G. Feijoo, M.T. Moreira, S. González-García, Coupling material flow analysis and network DEA for the evaluation of eco-efficiency and circularity on dairy farms, Sustainable Production and Consumption, 31:805–817, 2022. https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.03.02.

[13] M. Haupt, T. Kägi and S. Hellweg, Modular life cycle assessment of municipal solid waste management. Waste Management, 79. 815–827, 2018. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.03.035

[14] D.Wan, Y. T. Tang, G. Long, D. Higgitt, J. He, and D. Robinson, Future improvements on performance of an EU landfill directive driven municipal solid waste management for a city in England, Waste Management, 102,452–463,2020. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.009

[15] S.Kasavan, N. I. B. Mohd Ali, S. S. Bin Sharif Ali, N. A. B. Masarudin, ve S. B. Yusoff, Quantification of food waste in school canteens: A mass flow analysis, Resources, Conservation & Recycling, 164, 105176, 2021.https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105176.

[16] D. A. Turner, D. I. Williams, and S. Kemp, Combined material flow analysis and life cycle assessment as a support tool for solid waste management decision making, Journal of Cleaner Production, 129, 234-248, 2016. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.077.

[17] A. Allesch, P. H. Brunner Material Flow Analysis as a tool to improve waste management systems: The case of Austria, Environmental Science & Technology, 51(1):540–51, 2017. https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04204.

[18] M. B. Jensen, J. Møller, C Scheutz, Assessment of a combined dry anaerobic digestion and post-composting treatment facility for source-separated organic household waste, using material and substance flow analysis and life cycle inventory. Waste Management, 66:23–35, 2017. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.029.

[19] S. Van Ewijk, J. A. Stegemann, P. Ekins, Global life cycle paper flows, recycling metrics, and material efficiency. Journal of Industrial Ecology, 22:686–93, 2018. https://doi.org/10.1111/jiec.12613.

[20] E. Sevign´e-Itoiz, C. M. Gasol, J. Rieradevall, X. Gabarrell, Environmental consequences of recycling aluminum old scrap in a global market. Resource Conservation Recycling, 89:94–103, 2014. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.05.002.

[21] K. E. Maçin, Circular food waste management in Türkiye to stay within planetary boundaries. 4th International Conference on Sustainable, Circular Management and Environmental Engineering, İzmir, Türkiye, 9 Temmuz 2024. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455801034

[22] Türkiye İstatistik Kurumu, Türkiye Atık istatistikleri. https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Atik-Istatistikleri-2022-49570 (Erişim Tarihi: 6.10.2024)

[23] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. https://dongusel.csb.gov.tr (Erişim Tarihi: 4.10.2024)

[24] K. E. Maçin, O. A. Arıkan, M. Altınbas and A. Damgaard, Decarbonizing university campuses: A business model for food waste management at Istanbul Technical University (ITU) Ayazaga Campus, Turkey. Environmental Progress & Sustainable Energy, 43 (2), e14316, 2023. https://doi.org/10.1002/ep.14316

[25] K. E. Maçin, O. A. Arıkan and A. Damgaard, An MFA–LCA framework for goal-oriented waste management studies: 'Zero Waste to Landfill' strategies for institutions. Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy,2024. https://doi.org/10.1177/0734242X241287734

[26] P. H. Brunner and H. Rechberger, Practical Handbook of Material Flow Analysis. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, USA. 2004.

[27] Düzce İl Sifir Atik Yönetim Sistemi Planı. https://webdosya.csb.gov.tr/db/duzce/menu/il-sifir-at

ik-yonetim-sistemi-plani_20210402061151.pdf (Erişim Tarihi: 17.09.2024)
[28] Türkiye Cumhuriyeti Düzce Valiliği. Çevre, Şehircilik Ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü Düzce İli 2022 Yılı Çevre Durum Raporu https://duzce.csb.gov.tr/ (Erişim Tarihi: 14.09.2024)
[29] C. Riber, C. Petersen, T. H. Christensen, Chemical composition of material fractions in Danish household waste. Waste Management, 29, 1251-1257, 2009. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.09.013
[30] https://www.duzcedamla.com/video/18380392/duzce-cop-sorunu-tarih-oldu (Erişim Tarihi: 14.09.2024)
[31] Resmi Gazete. Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik. Sayı: 27533, Adres: http://mevzuat.basbakanlik.gov.tr, (Erişim Tarihi: 14.09.2024)
[32] O. Cencic, Nonlinear data reconciliation in material flow analysis with software STAN, Sustainable Environment Research, 26, 291–8, 2016. https://doi.org/10.1016/j.serj.2016.06.002.
[33] H. Fernandez-Mena, T. Nesme, S. Pellerin, Towards an Agro-Industrial Ecology: A review of nutrient flow modelling and assessment tools in agro-food systems at the local scale. Science of The Total Environment, 543, 467–479, 2016. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.032
[34] E.B. Gencsoy, The Effects of Different Amendments on the Compost. Doktora Tezi, Istanbul Teknik Üniversitesi, 2010.
[35] S. Cobo, A. Dominguez-Ramos, A. Irabien, Trade-offs between nutrient circularity and environmental impacts in the management of organic waste. Environmental Science & Technology, 2018. https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01590
[36] P. N. Pressley, J. W. Levis, A. Damgaard, M. A. Barlaz, J. F. DeCarolis, Analysis of material recovery facilities for use in life-cycle assessment. Waste Management, 35:307–317, 2015. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.012
[37] A. Fernández-Braña, G. Feijoo, ve C. Dias-Ferreir, Turning waste management into a carbon neutral activity: practical demonstration in a medium-sized European city. Science of Total Environment, 728, 138843,2020.https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138843.
[38] ELPCA. ELCD database 2.0. https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/(Erişim Tarihi: 26.08.2024)
[39] C. Tagliaferri, S. Evangelisti, R. Clift, P. Lettieri, C. Chapman, R. Taylor, Life cycle assessment of conventional and advanced two-stage energy-from-waste technologies for methane production. Journal of. Cleaner Production, 129, 144-158, 2016. DOI:10.1016/j.jclepro.2016.04.092.
[40] Ellen MacArthur Foundation. Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change www.ellenmacarthurfoundation.org/publications (Erişim Tarihi: 16.12.2024)
[41] B. P. Weidema and M. S. Wesnæs, Data quality management for life cycle inventories-an example of using data quality indicators. Journal of Cleaner Production,4,167–174,1996. https://doi.org/10.1016/S0959-6526(96)00043-1
[42] JRC, ILCD Handbook: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European Context. 1sted. Ispra, Italy: European Commission, 2011. https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-Recommendations-for-Life-Cycle-Impact-Assessment-in-the-European-context.pdf
[43] D. Wang, Y. T. Tang, G.Long, D. Higgitt, J. He, D. Robinson, Future improvements on performance of an EU landfill directive driven municipal solid waste management for a city in England. Waste Management, 102,452–463,2020. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.009
[44] A. M. Lipp, J. Lederer, The circular economy of packaging waste in Austria: An evaluation based on statistical entropy and material flow analysis. Resources, Conservation and Recycling, 217, 108193, 2025.https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108193 S.
[45] S. Aslam, F. Ali, A. Naseer, Z. Sheikh, Application of material flow analysis for the assessment of current municipal solid waste management in Karachi, Pakistan. Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy, 40(2), 185–194, 2022. https://doi.org/10.1177/0734242X211000427

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 1059-1070

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Chemical characterization and adulteration risk evaluation of commercially available sour pomegranate concentrates from different regions

Farklı bölgelerden temin edilen ticari ekşi nar konsantrelerinin kimyasal karakterizasyonu ve tağşiş riskinin değerlendirilmesi

Tuğba Gül Dikme[1, *], Sinem Güneş[2]

[1,2]*Harran University, Vocational School of Siverek, Food Technology Program, 63600, Siverek, Şanlıurfa, Türkiye*

Abstract

Sour pomegranate concentrate is a traditional food product valued for its distinctive taste and potential health benefits. However, concerns about adulteration have necessitated detailed chemical characterization. This study analyzed the chemical composition of traditionally produced sour pomegranate concentrate samples from different regions. The samples were evaluated for °Brix, pH, titratable acidity, sugar content, amino acid profile, and Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy. The results revealed that most samples had a °Brix value between 70.46% and 74.36%, with corresponding glucose and fructose levels ranging from 2.32 to 2.99 g/L and 2.09 to 2.73 g/L, respectively. One sample exhibited an unusual °Brix value of 72.7% but had significantly lower glucose (0.64 g/L) and fructose (0.43 g/L) content, suggesting possible adulteration. FTIR spectra showed deviations in the carbohydrate fingerprint region, supporting this observation. Additionally, amino acid profiling revealed notable regional differences. The Suruç sample exhibited the highest total essential amino acid content (126.2 µM), including valine (18.7 µM), lysine (17.4 µM), and threonine (15.9 µM), while the Silifke sample had the lowest levels overall. These findings emphasize the importance of standardizing traditional production processes and implementing advanced analytical techniques to detect adulteration. Further studies incorporating a broader sample set and additional methods could enhance the detection of fraudulent practices and contribute to the protection of traditional food products.

Keywords: Sour pomegranate Concentrate, Traditional production, Chemical analysis, FTIR, Adulteration detection

Özet

Ekşi nar konsantresi, kendine özgü tadı ve potansiyel sağlık yararları nedeniyle değerli bir geleneksel gıda ürünüdür. Ancak tağşişe yönelik artan endişeler, ayrıntılı kimyasal karakterizasyonu gerekli kılmıştır. Bu çalışmada, farklı bölgelerden geleneksel yöntemlerle üretilmiş ekşi nar konsantresi örneklerinin kimyasal bileşimi analiz edilmiştir. Örnekler; °Brix, pH, titrasyon asitliği, şeker içeriği, amino asit profili ve Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) spektroskopisi açısından değerlendirilmiştir. Sonuçlar, örneklerin °Brix değerlerinin %70.46 ile %74.36 arasında değiştiğini, glikoz ve fruktoz seviyelerinin ise sırasıyla 2.32–2.99 g/L ve 2.09–2.73 g/L aralığında olduğunu göstermiştir. Bir örnekte °Brix değeri yüksek olmasına rağmen (72.7%) şeker içeriği düşük bulunmuştur (glikoz: 0.64 g/L, fruktoz: 0.43 g/L); bu durum olası tağşişi işaret etmektedir. FTIR analizleri de karbonhidrat parmak izi bölgesinde sapmalar göstererek bu bulguyu desteklemiştir. Ayrıca, amino asit profillemesi örnekler arasında belirgin farklılıklar göstermiştir. Suruç örneği toplam esansiyel amino asit açısından en yüksek değere sahipti (126.2 µM) ve özellikle valin (18.7 µM), lizin (17.4 µM) ve treonin (15.9 µM) konsantrasyonları dikkat çekmiştir. Elde edilen bulgular, geleneksel üretim süreçlerinin standardizasyonu ve tağşişin tespitinde ileri analitik tekniklerin kullanımının önemini ortaya koymaktadır. Genişletilmiş örnek gruplarıyla yapılacak ileri çalışmalar, gıda sahteciliğinin önlenmesine ve geleneksel ürünlerin korunmasına katkı sağlayacaktır.

Anahtar kelimeler: Ekşi nar konsantresi, Geleneksel üretim, Kimyasal analiz, FTIR, Tağşiş tespiti

1 Introduction

Pomegranate (*Punica granatum* L.) has held significant cultural importance throughout history due to its high nutritional value and various health benefits. The anatomical structure of the fruit consists of different parts, including the flower, leaves, peel, arils, and seeds. Approximately half of the fruit's weight is composed of peel, while the remaining portion consists of seeds and arils. Pomegranate is rich in bioactive compounds, including vitamins, minerals, organic acids, polyphenols, and anthocyanins, which contribute to its strong antioxidant properties. The arils primarily contain water along with carbohydrates, pectin, and organic acids. Additionally, pomegranate arils are abundant in anthocyanins and flavonoids, which significantly enhance the fruit's antioxidant capacity. Pomegranate juice also contains tannin compounds, particularly gallic acid and punicalagin, which are notable bioactive components [1]. Research has shown that pomegranate exhibits higher antioxidant activity compared to many other fruits. Due to these properties, pomegranate stands out as a valuable fruit in both the nutrition and health fields [2, 3].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: t.gul@harran.edu.tr (T. Gül Dikme)
Geliş / Received: 07.04.2025 Kabul / Accepted: 05.06.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1671262

Pomegranate, due to its rich bioactive compound content, stands out as a functional food and has found widespread applications in the food industry. Pomegranate-based products exhibit a wide variety, including pomegranate juice, pomegranate juice concentrate, pomegranate jam, pomegranate jelly, sour pomegranate concentrate, pomegranate vinegar, pomegranate wine, pomegranate tea, and pomegranate seed oil [1, 4]. Although variations in antioxidant activity can be observed depending on the production processes, pomegranate juice and sour pomegranate concentrate are particularly notable for their high antioxidant capacity [5-8]. Traditional methods of producing sour pomegranate concentrate, in particular, contribute to its rich nutritional value and strong antioxidant properties. Due to these characteristics, the inclusion of sour pomegranate concentrate in a healthy diet is increasingly recommended [5].

Sour pomegranate concentrate is a traditional product obtained by concentrating pomegranate juice (*Punica granatum* L.), widely used in Middle Eastern cuisine [9, 10]. This thick, sweet-and-sour syrup can be produced using either traditional or commercial methods. The traditional production process involves washing, crushing, pressing, boiling, cooling, filtering, and bottling steps without the use of any additives, resulting in a completely natural product. In contrast, commercial production involves additional processes such as pasteurization, enzyme addition, clarification, filtration, and evaporation. Furthermore, commercial products often contain additives such as glucose/fructose syrup, citric acid, antioxidants, colorants, and preservatives to enhance taste, texture, and shelf life [9-11].

Sour pomegranate concentrate is rich in minerals, phenolic compounds, and flavonoids, which contribute to its high antioxidant capacity and potential anti-diabetic effects [9, 12]. Studies have shown that sour pomegranate concentrate exhibits stronger antioxidant activity compared to fresh pomegranate juice. In particular, homemade sour pomegranate concentrate has been reported to generally have higher antioxidant activity than commercial products [12, 13]. Animal studies suggest that the consumption of sour pomegranate concentrate is associated with improved antioxidant status and enhanced immune functions [14]. Additionally, a study conducted on mice revealed that sour pomegranate concentrates reduced weight gain in various organs, lowered triglyceride levels, and inhibited lipid peroxidation [13].

The physicochemical properties of sour pomegranate concentrate can vary significantly depending on the production method [13]. Notable differences between commercial and traditional products are observed, particularly in parameters such as pH, soluble solid content, and viscosity. However, in some commercial products, the addition of inexpensive ingredients like glucose syrup to reduce costs negatively impacts the product's authenticity and nutritional value. Advanced analytical techniques such as spectroscopic (UV-Vis, ATR-FTIR), chromatographic (HPLC), and hyperspectral imaging methods have been widely used to detect such adulteration [15, 16]. In particular, FTIR analysis provides valuable insights into product purity and compositional differences by examining spectral shifts in the carbohydrate region [15, 17-19].

In recent years, cases of adulteration and fraud in commercially produced sour pomegranate concentrate have increased due to the use of sugar syrups, synthetic acids, and other additives. This has made it essential to determine the chemical composition and authentic characteristics of traditionally produced sour pomegranate concentrate. The literature includes various studies that examine the physical, chemical, and antimicrobial properties of sour pomegranate concentrate produced in different regions, as well as comparisons between traditional and commercial products [5, 7, 17, 18, 20-22]. Expanding research on the detection of adulteration is crucial for the standardization of traditional production processes. However, most studies have focused on the general composition, organic acid content, phenolic profile, and antioxidant capacity of sour pomegranate concentrate. While there are studies on determining the protein content of sour pomegranate concentrate [9, 11, 14, 23], no detailed research has been found specifically analyzing its amino acid composition. Existing research primarily focuses on the amino acid profile of pomegranate juice [24-27]. Determining the amino acid composition of traditionally produced sour pomegranate concentrate not only contributes to understanding its nutritional value but also helps reveal compositional differences based on geographical variations. The findings obtained in this context are of great importance for both the standardization of traditional production processes and the protection of consumers.

Although there are various studies in the literature examining the chemical characteristics of pomegranate juice and pomegranate syrup, the present research distinguishes itself by conducting a comprehensive comparative analysis of commercially available products marketed as traditional sour pomegranate concentrate from different geographical regions, namely Siverek, Suruç, and Silifke. Unlike previous studies that primarily focus on samples produced under controlled laboratory conditions, this study evaluates real-market products, thereby reflecting the actual variability and potential risks associated with traditional production practices.

Importantly, this study integrates multiple analytical approaches, including FTIR spectroscopy and amino acid profiling, to assess both compositional differences and possible adulteration. The use of FTIR spectroscopy enabled the identification of spectral shifts indicative of ingredient modification, while the amino acid profile, particularly the levels of asparagine and glutamic acid, provided insight into the extent of thermal processing and the likelihood of Maillard reaction intermediates.

Moreover, since the products were not manufactured under the direct supervision of the researchers, the study serves as a market-oriented investigation into the authenticity and quality parameters of traditional sour pomegranate concentrates. This approach offers practical implications for quality control, consumer protection, and the traceability of regional food products.

The aim of this study is to determine the chemical composition of traditionally produced sour pomegranate concentrate, identify chemical differences among samples obtained from different production regions, and detect possible adulterations. The study includes analyses based on °Brix, pH, titratable acidity, sugar content, amino acid profile, and FTIR spectroscopy data of sour pomegranate concentrate samples.

2 Material and methods

2.1 Sour pomegranate concentrate samples

The sour pomegranate concentrate samples used in this study were obtained between May 5–16, 2024. The samples from Siverek and Suruç were sourced from local producers who reported using traditional methods, typically involving the concentration of sour pomegranate juice through prolonged boiling without added sugars or thickeners. The sample from Silifke was purchased from a boutique shop selling artisanal food products, and although labeled as "natural sour pomegranate concentrate," it was not produced under controlled conditions.

In this study, the term *sour pomegranate concentrate* refers to traditional pomegranate syrup produced solely by thermal evaporation of sour pomegranate juice. However, chemical composition and FTIR analysis revealed that the Silifke sample may have undergone adulteration or modification with added substances, potentially resembling a molasses-like product. All samples were stored in glass bottles under refrigerated conditions until analysis.

2.2 Determination of pH, titratable acidity, and Brix

The pH measurements of the sour pomegranate concentrate samples were performed using a benchtop pH meter (Isolab, Germany), which was calibrated daily using standard buffer solutions at pH 4.00 and 7.00. Measurements were carried out at room temperature (20 ± 2 °C), and results were recorded after stabilization of the electrode reading.

The soluble solid content (°Brix) of each sample was determined using a digital refractometer (Isolab, Germany) with an accuracy of ±0.1 °Brix. Prior to measurement, the refractometer was calibrated with distilled water. A few drops of the homogenized sample were placed on the prism, and the measurement was taken at 20 °C.

For titratable acidity analysis, the method described by Cemeroğlu [28] was followed. Samples were diluted at a ratio of 1:2 (w/w) with distilled water. After the addition of 3 drops of phenolphthalein indicator, titration was performed using 0.1 N NaOH solution until a light pink endpoint persisted for at least 30 seconds. The amount of NaOH used was recorded, and titratable acidity was calculated as citric acid equivalent using Equation (1):

$$\text{Titratable acidity, \% citric acid} = \frac{V \times f \times E}{M} \times 100 \quad (1)$$

V: Volume of 0.1 N NaOH used (mL),
f: Normality factor of the NaOH used in the solution,
E: Equivalent acid content per mL of 0.1 N NaOH (0.0064 g),
M: Volume or mass of the titrated sample (mL and g).

2.3 Sugar analysis

The samples were diluted with distilled water to achieve appropriate concentrations and homogenized using a vortex mixer for 1 minute. The prepared solutions were filtered through a 0.45 µm PTFE membrane filter and injected into the HPLC system for analysis.

The analyses were performed using a CARBOSep CHO-682 carbohydrate column (300 × 7.8 mm, Transgenomic, USA) and a refractive index (RI) detector (Shimadzu LC RID-10A, Japan). Ultra-pure water was used as the mobile phase, and the analysis was conducted under isocratic elution conditions with a flow rate of 0.4 mL/min. The column temperature was maintained at 80°C.

The identification of sugar components was carried out by comparing the retention times of the sample peaks with those of prepared standard sugar solutions.

2.4 Amino acid profile analysis

The amino acid composition of sour pomegranate concentrate samples was determined using liquid chromatography–tandem mass spectrometry (LC-MS/MS). For this purpose, the samples were first diluted in distilled water and homogenized. Proteins were precipitated by adding a solution of methanol: water (80:20, v/v), followed by centrifugation at 10,000 rpm for 10 minutes. The supernatant was filtered through a 0.22 µm PTFE membrane filter prior to injection.

Chromatographic separation was carried out on a C18 reverse-phase column (2.1 × 100 mm, 1.7 µm particle size) using gradient elution. The mobile phase consisted of solvent A (0.1% formic acid in water) and solvent B (0.1% formic acid in acetonitrile), at a flow rate of 0.3 mL/min. Detection and quantification were performed in multiple reaction monitoring (MRM) mode with positive electrospray ionization (ESI+). The identification of amino acids was based on the comparison of retention times and mass transitions with those of analytical standards. Quantification was carried out using external calibration curves generated with standard solutions of amino acids. Results were expressed in micromolar (µM) concentrations. This method was adapted and optimized based on previous studies conducted on fruit-based matrices such as pomegranate juice and molasses [25,26].

2.5 Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy

FTIR spectroscopy (IRTracer-100, Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan) was used to characterize the structural bonds of the samples. Spectral analyses were conducted in the 500–4000 cm^{-1} wavelength range with a 1 cm^{-1} spectral resolution.

2.6 Statistical analysis

All experimental analyses were conducted in triplicate, and the results were expressed as mean ± standard deviation (SD). The normality of the data distribution was verified using the Shapiro–Wilk test. One-way analysis of variance (ANOVA) was employed to determine statistically significant differences between the sour pomegranate concentrate samples from different regions. When ANOVA indicated significance ($p < 0.05$), mean separation was

performed using Tukey's Honest Significant Difference (Tukey HSD) test.

Statistical analyses were conducted using IBM SPSS Statistics version 25.0 (IBM Corp., Armonk, NY, USA). In the tables, different lowercase letters (e.g., a, b, c) next to the means indicate statistically significant differences ($p < 0.05$) among the samples within the same row.

3 Results and discussions

The results of pH, titratable acidity, °Brix, glucose, and fructose content are presented in Table 1 as mean ± SD values based on three replicates. One-way ANOVA followed by Tukey HSD test revealed that the differences in titratable acidity and sugar content among the samples were statistically significant ($p < 0.05$). Particularly, the Silifke sample showed significantly lower glucose and fructose levels compared to the others, while no significant difference was observed in °Brix values.

Table 1. The average pH, titratable acidity (% citric acid), °Brix (%), glucose, and fructose values of the three sour pomegranate concentrate samples

Sample name	pH	Titratable acidity (% citric acid)	°Brix (%)	Glucose (g/L)	Fructose (g/L)
Siverek	3.33±0.02^a	7.41±0.1^a	74.36±0.18^a	2.99±0.05^a	2.73±0.04^a
Suruç	3.47±0.03^a	7.20±0.12^a	70.46±0.23^a	2.32±0.03^b	2.09±0.02^b
Silifke	3.11±0.01^b	5.32±0.14^b	72.7±0.21^a	0.64±0.02^c	0.43±0.01^c

Note: Values are given as mean ± standard deviation (n = 3). Different superscript letters in the same column indicate statistically significant differences ($p < 0.05$, ANOVA and Tukey HSD).

3.1 pH and titratable acidity

The acidic characteristics of sour pomegranate concentrate are primarily attributed to the natural organic acids present in the fruit, as reflected by its pH and titratable acidity values. In this study, the average pH of the analyzed samples was found to be 3.30 ± 0.21, while the total titratable acidity was 6.64 ± 1.04%, expressed as citric acid equivalent.

The pH and titratable acidity of sour pomegranate concentrate are important indicators of its chemical quality. Previous studies on both commercial and homemade products emphasize the importance of these parameters in defining the product's acidic profile. These properties may also vary depending on production methods and the geographical origin of the concentrate.

Yilmaz et al. [9] reported the pH of commercial sour pomegranate concentrate as 1.74 ± 0.09. Similarly, Vardin et al. [18] analyzed seventeen commercial pomegranate juice concentrates from various regions in Türkiye (Şanlıurfa, Gaziantep, Hatay, and Adana), finding pH values between 1.34 and 2.78, and titratable acidity values ranging from 6.11% to 14.27%. In the same study, laboratory-produced samples from Şanlıurfa had pH values between 2.1 and 2.9, with titratable acidity ranging from 5.8% to 13.3%. İncedayı et al. [23] reported pH values of commercial samples between 0.87 and 1.98, and titratable acidity values between 5.76% and 9.83%. Similarly, İncedayı [5] found pH values of 1.69 and 2.83 in two different commercial samples, with corresponding acidity values of 10.25% and 7.14%, respectively.

Orak [7] analyzed a traditional pomegranate juice concentrate from Denizli (Aegean region, Türkiye) and reported a pH of 3.02 and a total organic acid content of 3.46%. Similarly, Karabıyıklı and Kışla [29] evaluated traditional sour pomegranate concentrate from Aydın, with pH values ranging from 2.51 to 2.64 and titratable acidity levels between 12.6% and 18%. Akpınar-Bayizit et al. [21] examined commercial samples obtained from local markets in Bursa and found pH values between 1.71 and 2.96. The total acidity, expressed as citric acid, ranged from 4.70 to 9.73 g/100 g.

Turkmen et al. [22] analyzed homemade pomegranate concentrates from Kilis (Eastern Mediterranean, Türkiye) and reported a pH of 3.51 ± 0.00 and a titratable acidity of 13.19 ± 0.12%. In contrast, commercial samples showed a lower pH of 3.06 ± 0.05 and a titratable acidity of 3.58 ± 0.02%. Hepsağ et al. [30] evaluated six traditionally produced homemade sour pomegranate concentrate samples from Osmaniye and nearby regions, finding pH values between 2.93 and 2.99 (mean: 2.96) and titratable acidity values ranging from 5.27% to 8.03%. Similarly, Oğuz et al. [20] reported that commercial sour pomegranate concentrate samples had pH values between 2.00 and 2.88, with titratable acidity ranging from 2.91% to 8.60%. In a laboratory-produced control sample from Gümüşhane, the pH was 3.03 ± 0.06, and titratable acidity was 8.75 ± 0.06%.

According to the quality criteria established by the Turkish Standards Institute (TS 12720) [31], the pH of sour pomegranate concentrate should range between 2.4 and 4.0, and its titratable acidity must be at least 6% (expressed as citric acid equivalent). In this study, the pH values of the analyzed sour pomegranate concentrate samples were found to be within the standard range. However, the Silifke sample had a titratable acidity of 5.32%, which falls below the minimum required value set by the standard. The apparent inconsistency between the pH and titratable acidity values in the Silifke sample may be attributed to the fact that there is no direct correlation between pH and total acidity. While pH reflects the concentration of free hydrogen ions (H^+), titratable acidity encompasses both free and bound organic acids. In the Silifke sample, although the pH was low, the total acidity remained relatively limited. This could be explained by the types of organic acids present, the buffering capacity of the sample, or the possible addition of acidulants (e.g., citric acid). Similar cases of low pH combined with low titratable acidity have been reported in the literature, particularly in commercial products with added components [18,15].

These findings indicate that the chemical properties of sour pomegranate concentrate can vary significantly depending on the production region and production method. The impact of traditional (homemade) versus commercial production techniques on acidity levels is particularly evident. In general, products produced using traditional methods tend to exhibit higher titratable acidity values, likely due to the absence of dilution or additive agents, compared to their commercially produced counterparts.

3.2 Soluble solid content (°Brix)

The Brix value, which indicates the total soluble solid content, is commonly used as a quality parameter for various agricultural products [20]. In this study, the average Brix value of the analyzed sour pomegranate concentrate samples was 72.51 ± 3.57, with relatively small variations among samples. This finding is consistent with the literature, which reports that the soluble solid content of sour pomegranate concentrate may vary depending on production region and processing methods.

Vardin et al. [18] analyzed seventeen commercial pomegranate juice concentrates collected from different regions of Türkiye (Şanlıurfa, Gaziantep, Hatay, and Adana) and reported soluble solid content ranging from 50.1% to 77.3%. In the same study, laboratory-produced samples had soluble solid content values between 60.6% and 70.2%. Similarly, Zor et al. [17] examined twenty-seven commercial and homemade sour pomegranate concentrate samples collected from three different regions of Türkiye (Ağrı, Gaziantep, and Hatay) and found total soluble solid content (°Brix) ranging from 60.60 to 76.20. İncedayi et al. [23] conducted a study on seven commercial sour pomegranate concentrate samples, reporting soluble solid content values ranging from 58.25 to 74.50 g/100 g. Likewise, İncedayi [5] determined the Brix values of two commercial sour pomegranate concentrate samples as 75.17 ± 0.33 and 73.8 ± 0.06, respectively.

Akpınar-Bayizit et al. [21] analyzed commercial sour pomegranate concentrate samples from local markets in Bursa and reported total soluble solid contents ranging from 62.40 to 75.00 g/100 g. Orak [7] examined a traditional pomegranate juice concentrate from Denizli and found a total soluble solid content of 61.24%. In a study by Türkmen et al. [22], homemade pomegranate concentrates from Kilis (Eastern Mediterranean, Türkiye) had a Brix value of 75.53 ± 0.35, while commercial samples exhibited a slightly higher value of 78.20 ± 1.04.

Hepsağ et al. [30] analyzed six homemade sour pomegranate concentrate samples produced using traditional methods in Osmaniye and nearby regions, reporting Brix values ranging from 58.0% to 69.5%, with an average of 63.41%. In a study by Özmert Ergin [10], the Brix values of three commercially produced samples from Kahramanmaraş, Antalya, and Burdur ranged from 69.90% to 86.23%. In contrast, three traditionally produced samples obtained from a local supermarket in Burdur had Brix values between 81.30% and 84.13%. Yilmaz et al. [9] reported a Brix value of 73.90 ± 2.30 for commercial sour pomegranate concentrate. Similarly, Oğuz et al. [20] analyzed fifteen commercial samples and found Brix values ranging from 59.20% to 75.70%. In their laboratory-produced control sample, the Brix value was measured as 72.33 ± 0.10.

Considering the TS 12720 standard [31], which stipulates that the soluble solid content of sour pomegranate concentrate must be at least 68%, it is evident that all analyzed samples meet this quality criterion.

Studies in the literature indicate that the Brix values of sour pomegranate concentrate vary within a wide range. This variation can be attributed to factors such as the pomegranate variety used, geographical location, production method, and seasonal differences.

3.3 Glucose and fructose

The sugar composition of pomegranate juice is influenced by various factors, including geographical origin, genetic differences, processing methods, and the ripening stage of the fruit. Literature reports indicate substantial variation in sugar content among pomegranate varieties grown in different countries. For example, in several Turkish cultivars, sucrose levels have been reported as very low or even undetectable [32,33]. Similarly, pomegranate varieties from Saudi Arabia [34] and Iran [35] were found to contain no sucrose. In contrast, studies on Spanish pomegranate juices identified glucose as the dominant sugar, followed by fructose, maltose, and sucrose [36]. In Indian varieties, fructose was reported as the major sugar, followed by glucose and mannitol [37]. These findings highlight the diversity in sugar profiles across pomegranate varieties, with glucose and fructose consistently recognized as the principal sugars in pomegranate juice.

During the concentration of pomegranate juice, levels of reducing sugars such as glucose and fructose are known to increase significantly [7]. In the present study, the glucose, fructose, xylose, mannose, and sucrose contents of sour pomegranate concentrate samples from Siverek, Suruç, and Silifke were analyzed. However, sucrose, xylose, and mannose were not detected in any of the samples. This result suggests that the natural sugar profile of the sour pomegranate concentrate was maintained. Moreover, according to the TS 12720 standard [31], sour pomegranate concentrate should not contain sucrose, making this absence a key indicator of compliance with quality standards.

Based on the results, the Siverek sample exhibited the highest concentrations of glucose (2.99 g/L) and fructose (2.73 g/L), followed by the Suruç sample with lower levels of glucose (2.32 g/L) and fructose (2.09 g/L). In contrast, the Silifke sample contained the lowest sugar concentrations, with only 0.64 g/L of glucose and 0.43 g/L of fructose. When these values are compared with the corresponding Brix measurements, which represent total soluble solid content, a notable discrepancy is observed. The Siverek and Suruç samples demonstrated a consistent relationship between their sugar content and Brix values (74.36% and 70.46%, respectively). However, despite its significantly lower glucose and fructose levels, the Silifke sample showed a disproportionately high Brix value (72.7%).

In the Silifke sample, the significantly lower glucose and fructose levels, despite a relatively high °Brix value, may also be attributed to thermal degradation processes. Extended heat treatment during production could have triggered Maillard reactions or caramelization, leading to the transformation of reducing sugars into intermediate or final browning products such as furfural or hydroxymethylfurfural. This interpretation is further supported by FTIR findings. In particular, the carbohydrate fingerprint region showed a shift from 1029/1031 cm^{-1} to 1022 cm^{-1}, and a distinct peak at 918 cm^{-1} was observed, which may indicate pyranose ring disruption or formation of

new glycosidic structures. The broadening of the C=O stretching peak at 1710 cm^{-1} also aligns with the presence of Maillard reaction products. These spectroscopic patterns collectively suggest that the sugar loss in the Silifke sample may be linked to intense thermal processing rather than dilution alone.

In addition, 5-hydroxymethylfurfural (HMF) is a critical indicator of thermal degradation in high-sugar, low-pH fruit products such as pomegranate concentrate. Although HMF and furfural derivatives were not assessed in this study, their inclusion in future analyses would provide deeper insight into the progression of Maillard and caramelization reactions and support more comprehensive quality evaluations.

3.4 Amino acid profile

Amino acid profile analyses revealed that sour pomegranate concentrate samples produced in different geographical regions exhibit distinct compositions (Figure 1). These differences suggest that the nutritional value and potential health benefits of sour pomegranate concentrate may vary by region of origin. In the Siverek sample, higher levels of beta-aminoisobutyric acid, cystathionine, serotonin, histamine, and phosphoethanolamine were detected. The Suruç sample generally showed the highest overall amino acid concentrations, with alanine, arginine, asparagine, serine, glutamic acid, and aspartic acid being predominant. In contrast, the Silifke sample exhibited lower levels of several amino acids compared to the other two regions, although it contained higher concentrations of glutamine and glycine.

The essential amino acid profiles of sour pomegranate concentrate samples from Siverek, Suruç, and Silifke revealed notable regional differences, underscoring their potential nutritional value. Among the identified essential amino acids (histidine, isoleucine, leucine, lysine, methionine, phenylalanine, threonine, tryptophan, and valine), the Suruç sample contained the highest concentrations, particularly of methionine, valine, threonine, and lysine. The Siverek sample exhibited moderate levels of essential amino acids, with relatively higher amounts of valine and threonine. In contrast, the Silifke sample showed the lowest levels of most essential amino acids, though it still provided a meaningful contribution to dietary intake. These findings suggest that sour pomegranate concentrate may serve as a functional food component, supplying essential nutrients important for protein synthesis, immune function, and metabolic health.

Although essential amino acids are not directly involved in flavonoid biosynthesis, they participate in metabolic pathways that affect flavonoid stability and production. For example, phenylalanine and its derivative tyrosine (a non-essential amino acid) serve as precursors in flavonoid synthesis [38]. Additionally, hydrophilic amino acids such as lysine have a high binding affinity for flavonoid compounds, forming stable complexes that may influence their bioavailability [39]. Previous studies have shown that the amino acid content of plant-based products is influenced by environmental factors, cultivar differences, and processing techniques. Since sour pomegranate concentrate is produced through water evaporation, it typically exhibits higher amino acid concentrations compared to fresh pomegranate juice.

To date, no specific study has been found on the amino acid profile of sour pomegranate concentrate; however, several studies have investigated the amino acid composition of pomegranate juice and fruit. For example, Abdygapparova et al. [24] analyzed the amino acid profiles of Ashyk-anar and Shah-Nar pomegranate varieties grown in the South Kazakhstan region. The study reported that the juice of the Ashyk-anar variety contained 17 amino acids, including 8 essential ones. Glutamic acid and aspartic acid were identified as the dominant amino acids, while phenylalanine levels ranged from 0.013% to 0.015%.

In a study conducted by Li et al. [26], the juices of six pomegranate varieties obtained from two different regions in China (Shandong and Xinjiang) were analyzed. The findings revealed that glutamine, serine, aspartate, and alanine were the most abundant amino acids in these samples. Additionally, the study reported that the total aromatic amino acid content varied based on regional differences, with pomegranate juice from the Shandong region exhibiting a higher total amino acid content compared to that from Xinjiang.

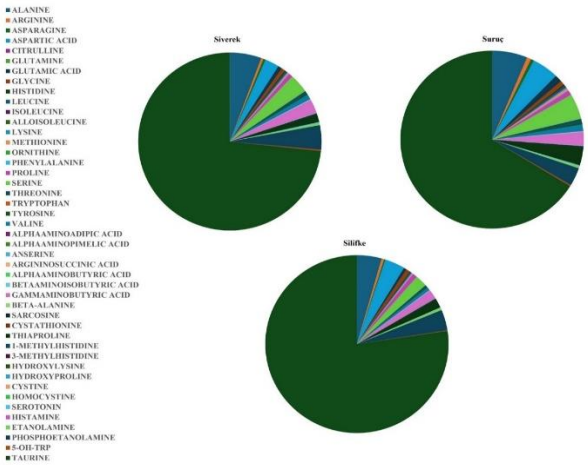


Figure 1. Average amino acid values (µM) of three different sour pomegranate concentrate varieties

Villa-Ruano et al. [27] conducted a ^1H NMR-based metabolomic study comparing organically and conventionally grown pomegranates. The results showed that organically grown pomegranates had higher levels of arginine, alanine, glutamine, methionine, phenylalanine, and proline, while conventionally grown ones contained more aspartic acid.

A study on commercial pomegranate varieties from Tunisia and China [40] analyzed their amino acid profiles and found that the seeds of both varieties were rich in storage proteins. The amino acid composition was independent of the flavor characteristics of the fruit. Glutamine, serine, and asparagine were particularly abundant in the seeds. These results indicate that pomegranate can be considered not only as a fruit but also as a valuable source of dietary protein.

Additionally, in a study conducted by Tezcan et al. [25], the amino acid profile of pomegranate juice was analyzed in detail. The findings revealed that serine, proline, and alanine were the dominant amino acids present in pomegranate juice.

The elevated taurine levels observed in sour pomegranate concentrate samples from Siverek, Suruç, and Silifke may be influenced by a combination of environmental and biochemical factors. Taurine (2-aminoethanesulfonic acid) is a sulfur-containing amino acid commonly found in animal-derived foods but can also accumulate in plants and microorganisms in response to osmotic stress, oxidative defense, and secondary metabolism [41,42]. Studies have shown that high salinity can stimulate taurine synthesis, particularly in microalgae such as Tetraselmis sp., suggesting that pomegranate trees in these regions may increase taurine production as an adaptive response to saline soils or drought conditions [43].

As a sulfonic acid, taurine biosynthesis is closely linked to sulfur metabolism, particularly through pathways involving sulfur-containing amino acids like cysteine and methionine [41,44]. Thus, variations in soil sulfur content may enhance taurine accumulation in pomegranate fruit. Taurine also plays a protective role against oxidative stress and helps regulate metabolic responses under environmental pressures [45]. Given the harsh climatic conditions in Siverek, Suruç, and Silifke, characterized by drought, high temperatures, intense UV radiation, and mineral-rich soils, pomegranate plants may upregulate taurine synthesis as part of their stress-response mechanisms.

Additionally, the traditional concentration process used in sour pomegranate production, which involves extended heating, may influence taurine levels. While many amino acids degrade with prolonged heat exposure, taurine is known to be thermally stable [46], potentially allowing it to accumulate at higher concentrations. Genetic variability among pomegranate cultivars may also contribute to differences in taurine levels, as certain genotypes may exhibit enhanced metabolic resilience under stress [47]. In summary, the high taurine content in sour pomegranate concentrate likely results from the interplay of plant physiology, environmental stressors, and processing methods.

In light of these findings, the amino acid profile analyses of sour pomegranate concentrate reveal both similarities and differences compared to the existing literature on pomegranate juice and seed composition. Further studies examining environmental influences and varietal differences would provide deeper insights into the factors contributing to these variations. Notably, sour pomegranate concentrate from the Suruç region appears to have a more nutritionally rich profile due to its higher amino acid content. Additionally, the presence of neurotransmitter-related amino acids (e.g., taurine, gamma-aminobutyric acid (GABA), and serotonin) suggests that sour pomegranate concentrate may offer potential neurological health benefits. Overall, these findings provide valuable insights into both the nutritional value and the potential functional food properties of sour pomegranate concentrate.

3.5 FTIR

FTIR analysis is a crucial method for determining the chemical composition of food products. Figure 2 presents the FTIR spectra of the sour pomegranate concentrate samples. In the Siverek, Suruç, and Silifke sour pomegranate concentrate samples, the FTIR peaks observed between 3310–3320 cm^{-1} are attributed to the stretching vibrations of hydroxyl (O–H) functional groups [48].

The FTIR peaks observed in the 2930–2940 cm^{-1} range across all samples correspond to C–H stretching vibrations of aromatic and aliphatic hydrocarbon structures. Additionally, due to the presence of carbohydrates, the C–H stretching vibrations identified between 3050–2800 cm^{-1} are specifically associated with CH and CH_2 groups [49]. These findings suggest that sour pomegranate concentrate possesses a diverse carbohydrate composition, comprising both simple and complex carbohydrates. In the case of carboxylic acids, the spectral region around 2900 cm^{-1} exhibits C–H stretching bands characteristic of $–CH_3$ (methyl) and $–CH_2$ (methylene) groups [50].

The FTIR peaks observed in the 1710–1715 cm^{-1} range correspond to C=O (carbonyl) stretching vibrations, typically indicating the presence of esters and other carbonyl-containing functional groups [15,17,51]. These compounds may originate from the organic acids naturally present in sour pomegranate concentrate or from thermal reactions, such as the Maillard reaction. Peaks in the 1640–1645 cm^{-1} region are attributed to C=C stretching vibrations of aromatic rings [52], but may also correspond to N–H bending vibrations in amides and amines. The Amide I band, located between 1600–1700 cm^{-1}, is particularly characteristic of C=O stretching and N–H bending in proteins [51,53], suggesting a link to the amino acid content of the samples. Furthermore, the Maillard reaction resulting from interactions between sugars and amino acids during heating may cause structural changes in proteins, leading to the appearance of specific FTIR peaks within this region.

Heating and concentration processes involved in sour pomegranate concentrate production promote the formation of carbonyl compounds. Non-enzymatic browning reactions, such as the Maillard reaction and caramelization, are

essential for the development of its characteristic color and aroma. FTIR peaks in the 1700–1600 cm^{-1} region correspond to carbonyl (C=O) stretching, conjugated double bonds (C=C), and imine (C=N) groups, reflecting compounds formed at various stages of these reactions [7, 54, 55]. Formation of melanoidins, Amadori compounds, and Schiff bases during these processes contributes to the dark color and enhances antioxidant properties of the concentrate [56, 57].

The FTIR peaks observed in the 1400–1200 cm^{-1} range can be attributed to C–O stretching, O–H bending, and C–H deformation vibrations, which are associated with carbohydrates, phenolic compounds, and organic acids [58-61].

Located between 950 and 1200 cm^{-1}, the so-called 'fingerprint region' for carbohydrates is important for identifying polysaccharide structures [62]. FTIR peaks at 1143 cm^{-1}, 1145 cm^{-1}, and 1147 cm^{-1} were observed in the Siverek, Suruç, and Silifke samples, respectively. These peaks correspond to C–H and C–O stretching vibrations, typically present in sugars like fructose and glucose. Peaks detected around 1029–1045 cm^{-1} are specifically associated with C–O stretching in glucose molecules [63].

The presence of a 918 cm^{-1} peak in the FTIR spectrum suggests its association with C–C stretching vibrations and C–H bending, which are characteristic of carbohydrate structures [48]. Additionally, the peaks observed in the 860–700 cm^{-1} range are related to the anomeric region of carbohydrates and may represent different ring deformations due to C–H bending [48, 64].

Comparison of FTIR spectra for sour pomegranate concentrate samples from Siverek, Suruç, and Silifke revealed that Siverek and Suruç shared similar spectral features, while the Silifke sample exhibited distinct differences. A broad absorption band between 3313–3319 cm^{-1} appeared in all samples, corresponding to hydroxyl (–OH) groups. These signals are likely related to water content, organic acids, and carbohydrates [48, 61]. Given that sour pomegranate concentrate is produced by thermal evaporation of juice, this broad band may also indicate the presence of bound water within the molasses-like matrix [60]. Entrapped water molecules could influence both the viscosity and the physical stability of the product. In the region around 1712–1710 cm^{-1}, carbonyl (C=O) stretching vibrations were observed, primarily associated with organic acids and esterified compounds. A slight shift toward 1710 cm^{-1} in the Silifke sample suggests possible differences in pH or in the composition of acidic constituents.

In the carbohydrate region (1022–1031 cm^{-1}), the Siverek and Suruç samples showed distinct peaks at 1029 cm^{-1} and 1031 cm^{-1}, respectively. In contrast, the Silifke sample exhibited a peak at 1022 cm^{-1}, which may suggest a structural change in carbohydrate content. Additionally, strong peaks were observed at 862, 813, and 771 cm^{-1} in the Siverek and Suruç samples, while these peaks were significantly weaker or absent in the Silifke sample. These peaks are linked to C–O–C glycosidic bonds and pyranose ring vibrations, commonly associated with natural polysaccharides like pectin [49]. Their absence in the Silifke sample, especially at 862, 813, and 771 cm^{-1}, may indicate dilution with sweeteners, acids, or other non-sugar components. Such changes could result from degradation or replacement of polysaccharide structures during processing or through the addition of different ingredients.

The distinct peak observed at 918 cm^{-1} in the Silifke sample was either very weak or entirely absent in the Siverek and Suruç samples. In infrared spectroscopy, the 900–950 cm^{-1} region is associated with C–O–C glycosidic bonds, pyranose ring vibrations, and β-glycosidic linkages [49]. One possible reason for the appearance of this peak in the Silifke sample could be the hydrolysis of polysaccharides and the breakdown of pectin. This suggests that structural modifications in carbohydrate composition may have occurred, possibly due to processing conditions or the addition of certain ingredients.

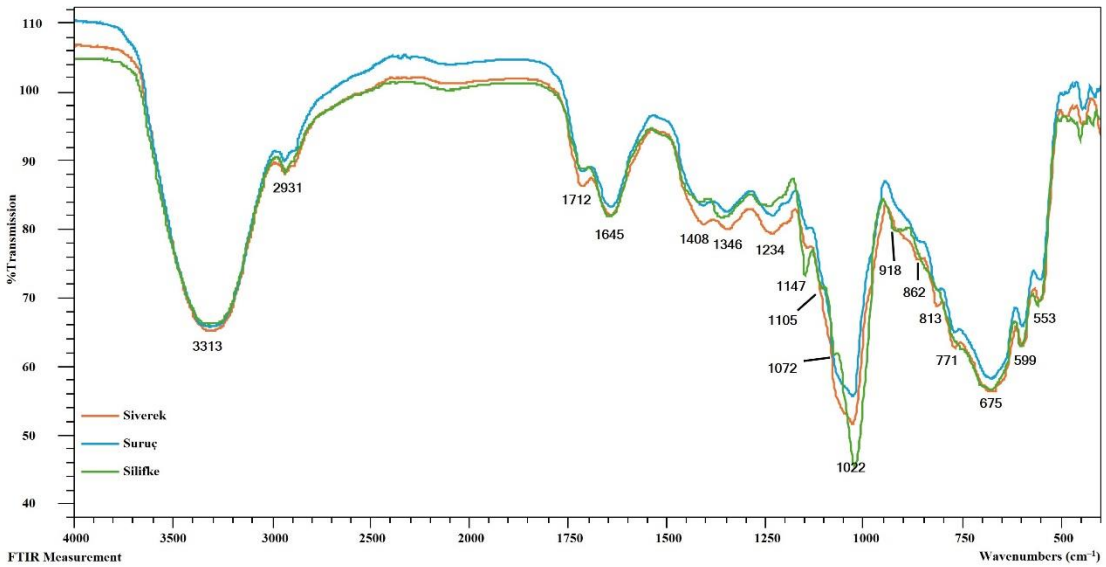


Figure 2. Comparative FTIR spectra of Siverek, Suruç, and Silifke sour pomegranate concentrate samples

Acid hydrolysis, potentially caused by acid addition, may degrade pectin into smaller oligosaccharides, leading to the appearance of a new FTIR peak around 918 cm^{-1}. The presence of this peak in the Silifke sample, but not in the Siverek or Suruç samples, suggests that another fruit juice or syrup may have been added. This modification could result in a distinct glycosidic spectral fingerprint, indicating a compositional deviation from traditionally produced sour pomegranate concentrate.

Additionally, the discrepancy between the high °Brix value and the low sugar content in the Silifke sample provides strong evidence of dilution or the addition of different components. When all these findings are considered, it can be concluded that the Siverek and Suruç samples exhibit the characteristics of natural sour pomegranate concentrate, whereas the Silifke (Mersin) sample may have been diluted, contained thickening agents, or undergone acidic modification.

Furthermore, the FTIR spectral characteristics of the Silifke sample suggest a more advanced stage of the Maillard reaction. Specifically, the broadened carbonyl (C=O) stretching band near 1710 cm^{-1} and the shift of the carbohydrate fingerprint region to 1022 cm^{-1}, along with the presence of a unique absorption band at 918 cm^{-1}, are indicative of sugar degradation and protein–sugar interactions. These spectral features, which were not observed in the Siverek and Suruç samples, imply that the Silifke concentrate may have been subjected to more intense thermal treatment, thereby promoting the formation of Maillard intermediates and final reaction products.

Despite showing the lowest reducing sugar content among the samples, the Silifke concentrate exhibited the highest °Brix value, which may indicate the use of non-reducing sugars or alternative carbohydrate sources. Although significant spectral differences were not observed in the 1700–1600 cm^{-1} region typically associated with Maillard reaction products, the shift observed in the carbohydrate fingerprint region (particularly at 1022 cm^{-1} and 918 cm^{-1}) suggests compositional modifications. These changes may not necessarily result from advanced Maillard products but rather from added carbohydrate-based thickeners or the degradation of sugars due to intense thermal processing. In contrast, the higher glucose and fructose levels detected in the Siverek and Suruç samples align with traditional production methods that preserve natural reducing sugars more effectively.

4 Conclusions

The chemical compositions of traditional sour pomegranate concentrate samples obtained from different regions were analyzed in detail. While the Siverek and Suruç samples exhibited similar chemical parameters, a notable discrepancy between sugar content and °Brix value was identified in the Silifke sample. FTIR spectroscopy analyses indicated potential compositional differences in the Silifke sample, suggesting the presence of additives. In particular, spectral shifts in the carbohydrate region pointed to the possible addition of sugar or the incorporation of different components. The discrepancy between the °Brix value and the reducing sugar content in the Silifke sample, along with the characteristic FTIR spectral shifts observed in the carbohydrate region, strongly suggests the possible addition of non-reducing sugars or other carbohydrate-based additives. While direct evidence of sugar adulteration was not quantified, the analytical findings point toward compositional modifications inconsistent with traditional sour pomegranate concentrate. These findings contribute to the understanding of quality parameters and potential adulteration risks in the production of traditional sour pomegranate concentrate. The use of advanced analytical techniques for detecting adulteration and fraud is crucial for protecting consumer rights and ensuring product safety. Future studies should incorporate broader chemical and sensory analyses of samples from various geographical regions and different harvest years, contributing to the standardization of traditional production processes. Additionally, the inclusion of specific adulteration markers such as hydroxymethylfurfural (HMF) and the use of isotope or NMR-based techniques could further enhance authenticity assessments.

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the Harran University Center for Science and Technology Application and Research (HÜBTAM) for their provision of laboratory infrastructure and technical assistance throughout the analytical procedures of this study.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 8%

References

[1] X. Yang, Z. Niu, X. Wang, X. Lu, J. Sun, M. Carpena, M. A. Prieto, J. Simal-Gandara, J. Xiao, C. Liu and N. Li. The Nutritional and Bioactive Components, Potential Health Function and Comprehensive Utilization of Pomegranate: A Review, Food Reviews International, 39, 6420 6446, 2023. https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2110260.

[2] F. Karadeniz, H. S. Burdurlu, N. Koca, and Y. Soyer, Antioxidant activity of selected fruits and vegetables grown in Turkey. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 29, 297–303, 2005.

[3] W. Song, C. M. Derito, M. K. Liu, X. He, M. Dong, and R. H. Liu, Cellular Antioxidant Activity of Common Vegetables. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 58, 6621–6629, 2010. https://doi.org/10.1021/jf9035832.

[4] S. Özmert Ergin, "Nar Meyvesi (*Punica granatum* L.) ile Farklı Nar Ürünlerinin Antioksidan Özellikleri. Akademik Gıda, 17, 243–251, 2019. https://doi.org/10.24323/akademik-gida.613590.

[5] B. İncedayı, Assessment of antioxidant properties and in-vitro bioaccessibility of some pomegranate products. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri

Enstitüsü Dergisi, 23, 96–110, 2021. https://doi.org/10.25092/baunfbed.829863.

[6] Z. Kalaycıoğlu and F. B. Erim, Total phenolic contents, antioxidant activities, and bioactive ingredients of juices from pomegranate cultivars worldwide. Food Chemistry, 221, 496–507, 2017. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.084.

[7] H. H. Orak, Evaluation of antioxidant activity, colour and some nutritional characteristics of pomegranate (*Punica granatum* L.) juice and its sour concentrate processed by conventional evaporation. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 60, 1–11, 2009. https://doi.org/10.1080/09637480701523306.

[8] L. Ryan and S. L. Prescott, Stability of the antioxidant capacity of twenty-five commercially available fruit juices subjected to an in vitro digestion. International Journal of Food Science & Technology, 45, 1191–1197, 2010. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02254.x.

[9] Y. Yilmaz, I. Çelik, and F. Isik, Mineral composition and total phenolic content of pomegranate molasses. Journal of Food, Agriculture and Environment, 5, 102–104, 2007.

[10] S. Özmert Ergin, Investigation of the physicochemical, nutritional properties and antioxidant activities of commercial and traditional pomegranate molasses samples. Food and Health, 6, 177–185, 2020, https://doi.org/10.3153/FH20019.

[11] S. A. Arafa, Chemical and biological studies on some pomegranate products. Egyptian Journal of Agricultural Sciences, 408, 396–408, 2013.

[12] M. Bou Dargham, J. Matar Boumosleh, A. Farhat, S. Abdelkhalek, E. Bou-Maroun, and L. El Hosry, Antioxidant and anti-diabetic activities in commercial and homemade pomegranate molasses in Lebanon. Food Bioscience, 46, 101540, 2022. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101540.

[13] Chalfoun-Mounayar, R. Nemr, P. Yared, S. Khairallah, and R. Chahine, Antioxidant and weight loss effects of pomegranate molasses. Journal of Applied Pharmaceutical Science, 2, 45–50, 2012. https://doi.org/10.7324/JAPS.2012.2602.

[14] G. Nasser, A. Sabbah, N. Chokeir, A. Hijazi, H. Rammal, and M. Issa, Chemical composition and antioxidant capacity of Lebanese molasses pomegranate. American Journal of PharmTech Research, 7, 2017.

[15] N. El Darra, H. N. Rajha, F. Saleh, R. Al-Oweini, R. G. Maroun, and N. Louka, Food fraud detection in commercial pomegranate molasses syrups by UV–VIS spectroscopy, ATR-FTIR spectroscopy and HPLC methods. *Food Control*, 78, 132–137, 2017. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.02.043.

[16] Z. Izadi and S. Kiani, Pomegranate molasses authentication using hyperspectral imaging system coupled with automatic clustering algorithm. Journal of Food Science, 89, 4216–4228, 2024. https://doi.org/10.1111/1750-3841.17134.

[17] M. Zor, K. Fettahoglu, and A. Menevseoglu, Chemometrics approach for the screening of potential adulterations in pomegranate sour by infrared spectroscopy and conventional methods. Journal of the Iranian Chemical Society, 21, 251–261, 2024. https://doi.org/10.1007/s13738-023-02922-7.

[18] H. Vardin, A. Tay, B. Ozen, and L. Mauer, Authentication of pomegranate juice concentrate using FTIR spectroscopy and chemometrics. Food Chemistry, 108, 742–748, 2008. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.11.027.

[19] G. S. Kılınç and N. Bağdatlıoğlu, Investigation of Adulteration of Sugars in Pomegranate Concentrate. 7th International Students Science Congress, pp. 150-154, 2023, pp. 150–154, İzmir, Türkiye, 12-13 May 2023. https://doi.org/10.52460/issc.2023.023.

[20] M. Oguz, B. Akar, and C. Baltaci, Physicochemical Analysis of Pomegranate Sours Produced by Traditional Method in Türkiye and The Investigation of Antioxidant Properties. Hittite Journal of Science and Engineering, 10, 125–134, 2023. https://doi.org/10.17350/HJSE19030000299.

[21] Akpinar-Bayizit, T. Ozcan, L. Yilmaz-Ersan, and E. Yildiz, Evaluation of Antioxidant Activity of Pomegranate Molasses by 2,2-Diphenyl-l-Picrylhydrazyl (DPPH) Method. International Journal of Chemical Engineering and Applications, 7, 71–74, 2016. https://doi.org/10.7763/ijcea.2016.v7.545.

[22] F. U. Turkmen, H. A. M. Takci, H. Saglam, and N. Sekeroglu, Investigation of some quality parameters of pomegranate, sumac and unripe grape sour products from Kilis markets. Quality Assurance and Safety of Crops & Foods, 11, 61–71, 2019. https://doi.org/10.3920/QAS2018.1293.

[23] B. İncedayi, C. E. Tamer, and Ö. U. Çopur, A Research on the Composition of Pomegranate Molasses Nar Ekşilerinin Bileşimi Üzerine Bir Araştırma. Journal of Agricultural Faculty of Uludag University, 24, 37–47, 2010.

[24] M. K. Abdygapparova, Zh. Serikuly, Z. K. Konarbaeva, S. A. Kumisbekov, and Sh. B. Tassybayeva, Research of The Composition of Pomegranate Juice in The South Kazastan Region. World Science, 2, 18–22, 2018.

[25] F. Tezcan, S. Uzaşçı, G. Uyar, N. Öztekin, and F. B. Erim, Determination of amino acids in pomegranate juices and fingerprint for adulteration with apple juices. Food Chemistry, 141, 1187–1191, 2013. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.04.017.

[26] Y. Li, P. Gu, L. Wang, S. Wang, H. Yang, B. Zhang, B. Zhu and C. Ma, Comparison of amino acid profile in the juice of six pomegranate cultivars from two cultivation regions in China. Journal of Food Processing and Preservation, 41, e13197, 2017. https://doi.org/10.1111/jfpp.13197.

[27] N. Villa-Ruano, A. Rosas-Bautista, E. Rico-Arzate, Y. Cruz-Narvaez, L. G. Zepeda-Vallejo, L. Lalaleo, D. Hidalgo-Martínez and E. Becerra- Martínez, Study of nutritional quality of pomegranate (*Punica granatum*

L.) juice using 1H NMR-based metabolomic approach: A comparison between conventionally and organically grown fruits. LWT, 134, 110222, 2020. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110222.

[28] B. Cemeroğlu, Meyve ve Sebze İşleme Teknolojisi. Bizim Grup Basımevi, Ankara, 2013.

[29] S. Karabiyikli and D. Kisla, Inhibitory effect of sour pomegranate sauces on some green vegetables and kisir. International Journal of Food Microbiology, 155, 211–216, 2012. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2012.02.006.

[30] F. Hepsağ, M. Ferliaslan, O. Duran, S. Okur, and Y. Yıldız, Osmaniye İlinde Geleneksel Ev Yapımı Üretilen Nar Ekşilerinin Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma. Batman University Journal of Life Sciences, 9, 95–107, 2019.

[31] TS 12720, Traditional sour pomegranate concentrate. Turkish Standards Institute, Ankara, Türkiye, 2016.

[32] M. Gündoğdu and H. Yılmaz, Bazı Standart Nar (*Punica granatum* L.) Çeşitleri ve Genotiplerine Ait Meyvelerin C Vitamini, Şeker ve Besin Elementleri İçeriklerinin Belirlenmesi. Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences, 23, 242–248, 2013.

[33] M. Cam, Y. Hisil, and G. Durmaz, Characterisation of Pomegranate Juices from Ten Cultivars Grown in Turkey. International Journal of Food Properties, 12, 388–395, 2009. https://doi.org/10.1080/10942910701813917.

[34] M. Salman, E. S. S. Abdel-Hameed, S. A. Bazaid, M. G. Al-Shamrani, and H. F. Mohamed, Liquid chromatography-mass spectrometry (LC-MS) method for the determination of sugars in fresh pomegranate fruit juices. Der Pharma Chemica, 6, 320–333, 2014.

[35] Fadavi, M. Barzegar, M. H. Azizi, and M. Bayat, Note. Physicochemical Composition of Ten Pomegranate Cultivars (*Punica granatum* L.) Grown in Iran. Food Science and Technology International, 11, 113–119, 2005. https://doi.org/10.1177/1082013205052765.

[36] P. Legua, P. Melgarejo, J. J. Martínez, R. Martínez, and F. Hernández, Evaluation of Spanish Pomegranate Juices: Organic Acids, Sugars, and Anthocyanins. International Journal of Food Properties, 15, 481–494, 2012. https://doi.org/10.1080/10942912.2010.491931.

[37] S. P. Singh, R. K. Pal, M. K. Saini, J. Singh, N. Gaikwad, S. Parashuram and C. Kaur, Targeted metabolite profiling to gain chemometric insight into Indian pomegranate cultivars and elite germplasm. Journal of the Science of Food and Agriculture, 99, 5073–5082, 2019. https://doi.org/10.1002/jsfa.9751.

[38] Y. Deng and S. Lu, Biosynthesis and Regulation of Phenylpropanoids in Plants. CRC Critical Reviews in Plant Sciences, 36, 257–290, 2017. https://doi.org/10.1080/07352689.2017.1402852.

[39] E. Codorniu-Hernández, A. Mesa-Ibirico, R. Herna´ Ndez-Santiesteban, L. A. Montero-Cabrera, F. Marti´Nez-Luzardo, J. L. Santana-Romero, T. Borrmann and W. D. Stohrer, Essential amino acids interacting with flavonoids: A theoretical approach. International Journal of Quantum Chemistry, 103, 82–104, 2005. https://doi.org/10.1002/qua.20391.

[40] W. Elfalleh, H. Hannachi, A. Guetat, N. Tlili, F. Guasmi, A. Ferchichi and M. Ying, Storage protein and amino acid contents of Tunisian and Chinese pomegranate (*Punica granatum* L.) cultivars. Genetic Resources and Crop Evolution, 59, 999–1014, 2012. https://doi.org/10.1007/s10722-011-9739-9.

[41] R. Tevatia, J. Allen, D. Rudrappa, D. White, T. E. Clemente, H. Cerutti, Y. Demirel and P. Blum, The taurine biosynthetic pathway of microalgae. Algal Research, 9, 21–26, 2015. https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.02.012.

[42] D. H. Lee, In Vitro Analysis of Taurine as Anti-stress Agent in Tomato (*Solanum Lycopersicum*)-Preliminary Study. Advances in Experimental Medicine and Biology, 803, 75–85, 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15126-7_7.

[43] E. Nurafiah, E. L. Widiastuti, and H. W. Maharani, Analysis of Taurine Content in Microalgae Tetraselmis sp. Cultured at Different Salinities. Jurnal Ilmiah Biologi Eksperimen dan Keanekaragaman Hayati (J-BEKH), 10, 53–60, 2023. https://doi.org/10.23960/jbekh.v10i2.304.

[44] H. Ripps and W. Shen, Review: Taurine: A ‘very essential’ amino acid. Molecular Vision, 18, 2673–86, 2012.

[45] M. A. Ashraf, R. Rasheed, I. Hussain, M. Iqbal, M. U. Farooq, M. H. Saleem, S. Ali, Taurine modulates dynamics of oxidative defense, secondary metabolism, and nutrient relation to mitigate boron and chromium toxicity in *Triticum aestivum* L. plants. Environmental Science and Pollution Research, 29, 45527–45548, 2022. https://doi.org/10.1007/s11356-022-19066-5.

[46] E. Gabirondo, K. ´Swiderek, E. Marin, A. Maiz-Iginitz, A. Larranaga, V. Moliner, A. Etxeberria and H. Sardon, A Single Amino Acid Able to Promote High-Temperature Ring-Opening Polymerization by Dual Activation. Advanced Science, 11, 1–10, 2024. https://doi.org/10.1002/advs.202308956.

[47] X. Liu, C. Wang, Q. Xu, D. Zhao, F. Liu, and B. Han, Metabolic Response of the Lycium barbarum Variety ‘Ningqi No. 7′ to Drought Stress. Plants, 13, 1935, 2024. https://doi.org/10.3390/plants13141935.

[48] K. Kozłowicz, R. Różyło, B. Gładyszewska, A. Matwijczuk, G. Gładyszewski, D. Chocyk, K. Samborska, J. Piekutand M. Smolewska, Identification of sugars and phenolic compounds in honey powders with the use of GC–MS, FTIR spectroscopy, and X-ray diffraction. Scientific Reports, 10, 16269, 2020. https://doi.org/10.1038/s41598-020-73306-7.

[49] E. Wiercigroch, E. Szafraniec, K. Czamara, M. Z. Pacia, K. Majzner, K. Kochan, A. Kaczor, M. Baranska and K. Malek, Raman and infrared spectroscopy of carbohydrates: A review. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 185, 317–335, 2017. https://doi.org/10.1016/j.saa.2017.05.045.

[50] R. Hill and I. W. Levin, Vibrational spectra and carbon–hydrogen stretching mode assignments for a series of n -alkyl carboxylic acids. The Journal of Chemical Physics, 70, 842–851, 1979. https://doi.org/10.1063/1.437517.

[51] Hamid, N. S. Thakur, A. Thakur, and P. Kumar, Effect of different drying modes on phenolics and antioxidant potential of different parts of wild pomegranate fruits. Scientia Horticulturae, 274, 109656, 2020. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109656.

[52] F. de Souza, V. A. Amaral, T. F. R. Alves, F. Batain, K. M. de M. Crescencio, C. T. de Barros, A. C. Rios and M. V. Chaud, Polyphenols isolated from pomegranate juice (*Punica granatum* L.): Evaluation of physical-chemical properties by FTIR and quantification of total polyphenols and anthocyanins contente. Brazilian Journal of Development, 6, 45355–45372, 2020. https://doi.org/10.34117/bjdv6n7-234.

[53] Sadat and I. J. Joye, Peak Fitting Applied to Fourier Transform Infrared and Raman Spectroscopic Analysis of Proteins. Applied Sciences, 10, 5918, 2020. https://doi.org/10.3390/app10175918.

[54] Degen, M. Hellwig, and T. Henle, 1,2-Dicarbonyl Compounds in Commonly Consumed Foods. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 60, 7071–7079, 2012. https://doi.org/10.1021/jf301306g.

[55] Ioannou, Real Time Monitoring the Maillard Reaction Intermediates by HPLC- FTIR. Journal of Physical Chemistry & Biophysics, 6, 6–10, 2016. https://doi.org/10.4172/2161-0398.1000210.

[56] G. F. Mohsin, F. J. Schmitt, C. Kanzler, J. Dirk Epping, S. Flemig, and A. Hornemann, Structural characterization of melanoidin formed from D-glucose and L-alanine at different temperatures applying FTIR, NMR, EPR, and MALDI-ToF-MS. Food Chemistry, 245, 761-767, 2018. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.115.

[57] G. F. Mohsin, W. J. Al-Kaabi, and A. K. Alzubaidi, Describing Polymers Synthesized from Reducing Sugars and Ammonia Employing FTIR Spectroscopy. Baghdad Science Journal, 19, 1297, 2022. https://doi.org/10.21123/bsj.2022.6527.

[58] V. Adiani, S. Gupta, R. Ambolikar, and P. S. Variyar, Development of rapid method to assess microbial quality of minimally processed pomegranate arils using FTIR. Sensors and Actuators B: Chemical, 260, 800–807, 2018. https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.01.095.

[59] Aykac, C. Cavdaroglu, and B. Ozen, Authentication of pomegranate juice in binary and ternary mixtures with spectroscopic methods. Journal of Food Composition and Analysis, 117, 105100, 2023. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.105100.

[60] Ilaslan, M. Ozgolet, and S. Karasu, Rapid detection of maltodextrin adulteration in pomegranate sour using ATR-FTIR spectroscopy and chemometrics. Journal of Food Composition and Analysis, 140, 107313, 2025. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.107313.

[61] E. Arendse, H. Nieuwoudt, O. A. Fawole, and U. L. Opara, Effect of Different Extraction Methods on the Quality and Biochemical Attributes of Pomegranate Juice and the Application of Fourier Transformed Infrared Spectroscopy in Discriminating Between Different Extraction Methods. Frontiers in Plant Science, 12, 1–11, 2021. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.702575.

[62] Q. Guo, L. Ai, and S. Cui, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) for Carbohydrate Analysis. In: Methodology for Structural Analysis of Polysaccharides, Springer International Publishing, pp. 69-71, 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96370-9.

[63] G. F. Mohamed, M. S. Shaheen, S. K. H. Khalil, A. M. S. Hussein, and M. M. Kamil, Application of FT-IR Spectroscopy for Rapid and Simultaneous Quality Determination of Some Fruit Products. Nature and Science, 9, 21–31, 2011.

[64] Sahlan, S. Karwita, M. Gozan, H. Hermansyah, M. Yohda, Y. J. Yoo and D. K. Pratami, Identification and classification of honey's authenticity by attenuated total reflectance Fourier-transform infrared spectroscopy and chemometric method. Veterinary World, 12, 1304–1310, 2019. https://doi.org/10.14202/vetworld.2019.1304-1310.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 1071-1081

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Ağır çıkma bulunan betonarme binalarda dış çerçeve düzensizliğinin deprem davranışına etkisinin incelenmesi

Investigation of the effect of external frame irregularity on seismic behavior in reinforced concrete buildings with heavy overhangs

Ömer Faruk Osmanlı[1], Ömer Faruk Taş[2,*], Burak Çakıl[3], Ozan İnce[4], Erkut Sayın[5], Muhammet Karaton[6]

[1,2,3,4,5,6] *Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ, Türkiye*

Öz

Bu çalışmada kapalı ağır çıkma bulunan betonarme binalarda dış çerçeve düzensizliğinin yapısal sistemin sismik yükler altındaki davranışına etkileri incelenmiştir. Bu amaçla dış çerçeve bağlantılarının farklı olarak tasarlandığı ağır çıkma bulunan betonarme iki yapının zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Nümerik analizlerde kuvvete dayalı fiber eleman yöntemi kullanılmış ve çözümler SeismoStruct programı ile elde edilmiştir. Deprem yüklemesi olarak Kahramanmaraş-Pazarcık (Mw=7.7) depreminin Türkoğlu istasyonunda ölçülen ivme kayıtları kullanılmıştır. Binaların deprem tepkilerinin karşılaştırmalarında tepe yerdeğiştirme, dönme, taban kesme kuvveti, taban devrilme momenti, göreli kat yerdeğiştirme, doğrusal hız ve ivme, açısal hız ve ivme değerleri dikkate alınmıştır. Ayrıca oluşturulan her iki modelde meydana gelen hasarlı kolon ve kiriş eleman sayıları belirlenen hasar sınır seviyelerine göre karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, ağır çıkma bulunan betonarme binalarda dış çerçeve sürekliliğinin olmaması binanın deprem davranışı açısından önemli derecede olumsuz etkilere sebep olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Ağır çıkmalar, Çerçeve düzensizliği, Kuvvete dayalı fiber eleman yöntemi, Deprem davranışı, Hasar Sınırları

Abstract

This study investigates the effects of external frame irregularities on the seismic behavior of structural systems in reinforced concrete buildings with heavy overhangs. For this purpose, nonlinear time history analyses of two reinforced concrete buildings with heavy overhangs, designed with different external frame connection configurations, were conducted. The force-based fiber element method was used in numerical analyses, and the solutions were obtained using the SeismoStruct software. The acceleration records measured at the Türkoğlu station during the Kahramanmaraş-Pazarcık (Mw=7.7) earthquake were utilized as seismic loading. In the comparison of the seismic responses of the buildings, parameters such as top displacement, rotation, base shear force, base overturning moment, interstory drift, linear velocity and acceleration, as well as angular velocity and acceleration, were considered. Additionally, the number of damaged column and beam elements in both models was evaluated and compared according to the defined damage limit levels. As a result, it was determined that the lack of external frame continuity in reinforced concrete buildings with heavy overhangs significantly adversely affects the seismic behavior of the building.

Keywords: Heavy overhangs, frame irregularity, force-based fiber element method, earthquake behavior, damage limits

1 Giriş

Mühendislik yapıları depremlere maruz kaldıklarında, sismik aktivitenin yoğunluğuna ve büyüklüğüne bağlı olarak değişen derecelerde hasar alırlar. Bu yapıların tasarımı ve inşasında kusurların ve düzensizliklerin varlığı, deprem sırasında meydana gelen hasarın derecesini daha da artırabilir. Depreme dayanıklı binalarda hem tasarım aşaması hem de sonraki inşaat aşamasını titizlikle uygulamak kritik öneme sahiptir. Özellikle deprem tehlikelerine karşı savunmasız olan yerleşim alanlarında potansiyel can kaybını ve mülkün tahrip edilmesini en aza indirmek gerekmektedir. Deprem sebebiyle özellikle betonarme binalarda meydana gelen olumsuz etkileri artıran çok sayıda faktör vardır. Bu faktörler genel olarak malzemeden kaynaklanan hasarlar, tasarımdan kaynaklanan hasarlar, donatı detaylarından kaynaklanan hasarlar olarak sınıflandırılmaktadır. Tasarımdan kaynaklanan hasarlar ise kısa kolon, güçlü kiriş-zayıf kolon, yetersiz kesme dayanımı, yumuşak ve zayıf kat, çerçeve süreksizliği ve ağır çıkma vb. olarak detaylandırılmaktadır [1-10].

Bina performansını etkileyen unsurlardan biri olan ağır çıkmalar, yapının statik ve dinamik davranışını değiştirebilmekte ve özellikle sismik yükler altında, binanın rijitliği, kütle dağılımı ve periyodu gibi temel parametrelerini etkileyerek deprem performansında olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir. Yapılardaki ağır çıkmalar, tipik olarak zemin katın üstünde yer alan seviyelerde mevcut yaşam

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: oftas@firat.edu.tr (Ö. F. Taş)
Geliş / Received: 18.04.2025 Kabul / Accepted: 10.06.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1677915

alanını artırmak amacıyla inşa edilen önemli yapısal elemanlar olarak hizmet eder. Genellikle binanın dış cephesindeki ağır çıkmalar, hem konut hem de ticari mimari çalışmalarda kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu ağır çıkmaların betonarme yapılara dâhil edilmesi, söz konusu binanın statik ve dinamik özelliklerini değiştirebilmektedir. Bu tür yapısal değişiklikler, tüm yapının rijitliğini, kütle dağılımını ve salınım periyodunu etkileyebilir ve böylece genel yapısal performansıyla ilgili olumsuz sonuçlara yol açabilir [11].

Çok katlı betonarme binalardaki ağır balkonlar ve çıkma katlar, kütle merkezini yukarı kaydırmakta; buna bağlı olarak deprem sırasında sismik yanal kuvvetleri ve devrilme momentlerini artırmaktadır. Ağır beton parapetlerle çevrelenmiş geniş çıkma konsol açıklıklarına sahip balkonlu binalar, Türkiye'de meydana gelen son depremlerde, normal binalara kıyasla daha ağır hasarlar almıştır [12]. 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrasında ağır çıkma bulunan betonarme binalarda meydana gelen hasar örnekleri Şekil 1'de görülmektedir.

Şekil 1. 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrası ağır çıkma bulunan hasarlı bina örnekleri [3]

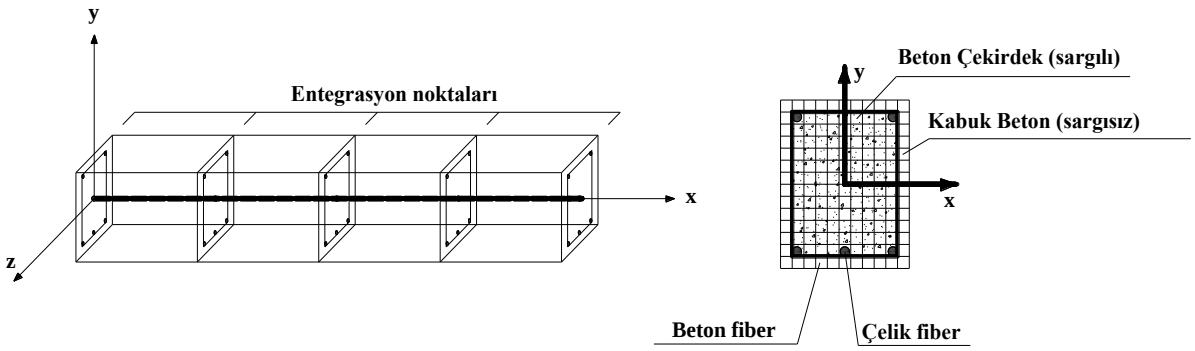
Bu ağır çıkmaların betonarme binaların deprem dayanıklılığı üzerindeki etkilerinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Literatürde ağır çıkmaların deprem esnasında etkilerini inceleyen çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Işık ve Akat [11] çalışmalarında, betonarme yapılarda yaygın olarak kullanılan farklı ağır çıkmaların binanın deprem performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sayısal analizler için, ağır çıkma olmayan bir referans bina modeli seçilmiş ve bu modelin farklı cephelerine çeşitli uzunluklarda ağır çıkmalar eklenerek toplam 16 yapı tasarlanmıştır. Analizler sonucunda, ağır çıkmaların artmasıyla taban kesme kuvveti, periyot ve kütlenin arttığı, deprem performansının ise azaldığı belirlenmiş ve deprem performansının ağır çıkma miktarındaki artıştan olumsuz etkilendiği görülmüştür. Doğangün [13] çalışmasında 1 Mayıs 2003'te Bingöl depreminde meydana gelen yapısal hasarın nedenlerinden birinin ağır çıkmaya sahip binaların olduğunu tespit etmiştir. Işık ve Tozlu [14] çalışmalarında hızlı değerlendirme yöntemini kullanmışlardır. Dikkate alınan ağır çıkmaya sahip binaların performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Meral ve İnel [15] çalışmaları kapsamında 2, 4 ve 7 katlı olmak üzere 3 farklı kat için toplam 144 bina modeli oluşturmuşlardır. Farklı parametrelerin etkilerini ortaya çıkarmak için doğrusal olmayan itme analizlerini ağır çıkmaya sahip binalara uygulamış ve sonuçlarını incelemişlerdir. Öz [16] çalışmasında, üç farklı kat için 1.50 m çıkma ile oluşturduğu yapısal modeller üzerinde doğrusal ve doğrusal olmayan zaman alanında analizler gerçekleştirmiş ve kapalı ağır çıkmaların binanın sismik davranışı üzerindeki etkisini incelemiştir. Meral [17] çalışmasında kapalı çıkmaların betonarme binaların deprem davranışına etkilerini doğrusal olmayan zaman tanım alanında yapılan analizlerle incelemiştir. 2, 4 ve 7 katlı referans binalara kapalı çıkmalar eklenerek kirişli ve kirişsiz kapalı çıkmalı modeller oluşturulmuş ve doğrusal olmayan analizler uygulanmıştır. Sonuç olarak, kirişsiz kapalı çıkmalı binalarda taban kesme kuvvetinin daha düşük, deplasman taleplerinin ise daha yüksek olduğunu tespit etmiştir. Karki ve Parajuli [18] bu çalışmalarında betonarme çerçeve binaların sismik tepki parametreleri üzerinde konsol çıkmalarının etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında, bir ve iki cephede farklı uzunluklarda konsol çıkmalar eklenmiş 3 katlı ve 5 katlı toplam 18 bina modeli oluşturulmuş ve analizler uygulanmıştır. Elde edilen bulgular, konsol çıkmaların periyot, taban kesme kuvveti, katlar arası ötelenme oranı ve devrilme momenti gibi sismik tepki parametrelerinde artışa yol açtığını göstermiştir. Kolonlardaki burulma momenti 3.53 kat, eğilme momenti ise 1.5 kat artarken, konsol sehimi izin verilen sınırları aşmıştır. Bu sonuçlarla, sismik güvenlik için konsol çıkmalar üzerinde uygun mühendislik analizlerinin yapılmasının önemini vurgulamışlardır.

Literatürde ağır çıkma bulunan betonarme binalar farklı parametreler açısından ve farklı analiz yöntemleri ile değerlendirilmiş olsa da bu tip binalarda dış çerçeve süreksizliğinin ve ağır çıkma bulunan doğrultuların, yapının deprem davranışına etkisi belirsizliğini korumaktadır. Bu çalışmada, özellikle kapalı ağır çıkmalar içeren betonarme binalarda, dış çerçeve düzensizliğinin yapısal sistemin sismik yükler altındaki davranışına olan etkileri incelenmiştir. Bu doğrultuda, dış çerçeve bağlantılarının farklı şekilde tasarlandığı ağır çıkmalı iki betonarme yapının zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizleri kuvvete dayalı fiber eleman yöntemi ile elde edilmiştir. Binaların deprem davranışları, tepe yerdeğiştirme, dönme, taban kesme kuvveti, taban devrilme momenti, göreli kat yerdeğiştirme, doğrusal hız ve ivme ile açısal hız ve ivme değerleri üzerinden karşılaştırılmıştır. Ayrıca, her iki modelde meydana gelen hasarlı kolon ve kiriş eleman sayıları da kıyaslanmıştır.

2 Materyal ve metot

2.1 Fiber eleman yöntemi

Fiber Eleman Yöntemi temelinde hem kuvvete dayalı hem de deplasmana dayalı formülasyonlara dayanmaktadır. Kuvvete dayalı Fiber Eleman Yönteminde dikkate alınan betonarme eleman kesitinin kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi boyuna fiberlerin tek eksenli gerilme-şekil değiştirme bağlantısı kullanılmaktadır. Bu yöntemde düzlem kesitlerin deformasyon süresi boyunca yine düzlem kaldığı varsayılmaktadır. Ayrıca betonarme bir elemanın doğrusal olmayan davranışı, kesitte kullanılan fiberlerin doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme davranışı ile sağlanmaktadır.



Şekil 2. Fiber Eleman Yönteminde betonarme eleman ve kesit detayları

Fiber Eleman Yönteminde betonarme eleman kesiti entegrasyon noktalarından kesitlere ayrılır. Ayrılan kesitler; beton kabuk fiberleri, beton çekirdek fiberleri ve çelik fiberler olarak sınıflandırılmış fiber elemanlara ayrıklaştırılır. Bu yöntemde kullanılan entegrasyon noktaları ve fiber eleman ayrıklaştırılması Şekil 2'de verilmiştir. Bir elemandaki entegrasyon noktalarının sayısı ve bir kesitteki fiberlerin sayısı, elemanın davranışını ve dolayısıyla yapının davranışını etkilemektedir [19, 20]. Betonarme bir elemanın kuvvete dayalı Fiber Eleman Yönteminin formülasyonunda deformasyon enterpolasyon fonksiyonu $a(x)$ ve kuvvet enterpolasyon fonksiyonu $b(x)$ kullanılmaktadır. Eleman fleksibilite matrisi $\boldsymbol{F}^{i-1}$ ve enterpolasyon fonksiyon matrisine dayanan bir matris olarak tanımlanan $\boldsymbol{T}$ matrisi aşağıda yer alan denklemlerle ifade edilmektedir.

$$\boldsymbol{F}^{i-1} = \left[\int_0^L b^T(x)\cdot \boldsymbol{f}^{i-1}(x)\cdot b(x)\cdot dx\right] \tag{1}$$

$$\boldsymbol{T} = \left[\int_0^L b^T(x)\cdot a(x)\cdot dx\right] \tag{2}$$

Eleman deformasyon bölgesi, aşağıdaki denklemler kullanılarak esnekliğe bağlı şekil fonksiyonları ile temsil edilir;

$$a(x) = \boldsymbol{f}^{i-1}(x)\cdot b(x)\cdot\left[\boldsymbol{F}^{i-1}\right]^{-1} \tag{3}$$

Burada, $\boldsymbol{f}$ bir kesitin fleksibilite matrisidir. Üst indis i ise yapısal düzeyde Newton-Raphson iterasyon döngüsünün iterasyon sayısını gösterir (Taucer vd. 1991). Böylece $\boldsymbol{f}^{i-1}$ matrisi, $(i-1)$'inci Newton-Raphson iterasyonunda bir kesitin fleksibilite matrisini gösterir. Enterpolasyon fonksiyonları kullanılarak, kesit deformasyonları ile eleman deformasyonları arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\Delta d^i(x) = \boldsymbol{f}^{i-1}(x)\cdot b(x)\cdot\left[\boldsymbol{F}^{i-1}\right]^{-1}\Delta q^i \tag{4}$$

Burada, Δd ve Δq sırasıyla değişken kesit deformasyonu ve değişken eleman deformasyonudur. $\boldsymbol{T}$ matrisi, deformasyon şekil fonksiyonlarının özel seçimi kullanılarak 3x3 tanımlı $\boldsymbol{I}$ matrisine dönüşür. Bu dönüşüm durumu aşağıdaki denklem ile gösterilebilir;

$$\boldsymbol{T} = \left[\int_0^L b^T(x)\cdot a(x)\cdot dx\right] = \left[\int_0^L b^T(x)\cdot \boldsymbol{f}^{i-1}(x)\cdot b(x)\cdot dx\right]\cdot\left[\boldsymbol{F}^{i-1}\right]^{-1} = \boldsymbol{I} \tag{5}$$

Deformasyon enterpolasyon fonksiyonu döngüsel çözüm sırasında değişmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada önerilen yöntem kuvvete dayalı fiber eleman yöntemi olarak adlandırılmaktadır. Kuvvet alanı, iki eğilme momentinin doğrusal ve eksenel kuvvetin sabit olduğu kesit kuvvet vektörü kullanılarak ifade edilir (Taucer vd., 1991). Böylece, kuvvet enterpolasyon fonksiyonu bu ifadenin matris formundaki sonucu ile aşağıdaki gibi elde edilir;

$$b(x) = \begin{bmatrix} \left(\frac{x}{L}-1\right) & \left(\frac{x}{L}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{x}{L}-1\right) & \left(\frac{x}{L}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

Kuvvet enterpolasyon fonksiyonu, $b(x)$ aşağıdaki denklemi kullanarak eleman kuvvet vektörü ile eleman boyunca kuvvet dağılımları arasındaki ilişkiyi sağlar.

$$\Delta\mathbf{D}^i(x) = b(x)\cdot\Delta\mathbf{Q}^i \tag{7}$$

Burada, $\Delta\mathbf{D}(x)$ ve $\Delta\mathbf{Q}$ sırasıyla değişken kesit kuvvet vektörü ve değişken eleman kuvvet vektörüdür. Fiber şekildeğiştirme $\Delta\mathbf{e}^j(x)$'nin artışları,

$$\Delta\mathbf{e}^j(x) = I(x)\cdot\Delta\mathbf{d}^j(x) \tag{8}$$

denklemi yardımıyla ifade edilmektedir. Burada, üst simge j eleman seviyesindeki iterasyon sayısı, $\Delta\mathbf{d}^j(x)$ verilen

deformasyon artışları ve $\mathbf{I}(x)$ olarak tanımlanabilen kesit uyumluluk matrisidir ve bu matris,

$$\mathbf{I}(x)=\begin{bmatrix} -y_1 & z_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -y_{ifib} & z_{ifib} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -y_n & z_n & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

şeklinde gösterilmektedir. Bu denklemde *x*, ilgili elemanın doğrultusu boyunca belirlenen entegrasyon noktasının konumunu, y_{ifib} ve z_{ifib} ise belirlenen entegrasyon kesitindeki fiberin konumunu göstermektedir. Fiber şekil değiştirmedeki artışlar dikkate alınarak, fiberin uygun gerilme-şekil değiştirme ilişkisi kullanılarak tüm fiberlerin yeni tanjant modülü (E^{j}_{ifib}) ve gerilmesi (σ^{j}_{ifib}) hesaplanmaktadır. Bu durumda kesitinin yeni teğet rijitlik matrisi $(\mathbf{k}^{j}(x))$ aşağıdaki denklem ile belirlenir,

$$\mathbf{k}^{j}(x)=\mathbf{I}^{T}(x)\cdot(\mathbf{E}^{j}_{\tan}\mathbf{A})\cdot\mathbf{I}(x) \quad (10)$$

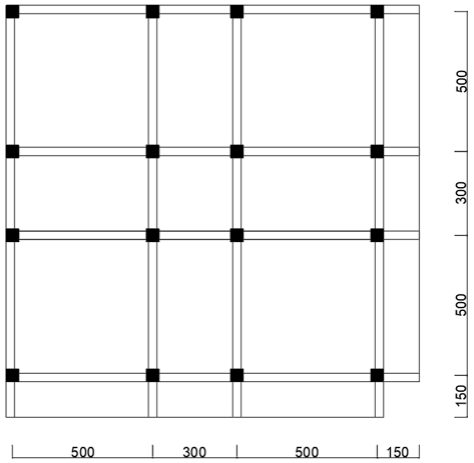
Burada, $\mathbf{E}^{j}_{\tan}$ diyagonal matris formundaki fiber gerilmelerinden oluşan tanjant modülü ve $\mathbf{A}$ ise fiber alanlarının (A_{ifib}) diyagonal matris formudur. Sonuç olarak kesitin yeni tanjant rijitlik matrisi açık formda şu şekilde ifade edilebilir,

$$\mathbf{k}^{j}(x)=\begin{bmatrix} \sum_{ifib=1}^{n(x)} E^{j}_{ifib}\cdot A_{ifib}\cdot y^{2}_{ifib} & \sum_{ifib=1}^{n(x)} E^{j}_{ifib}\cdot A_{ifib}\cdot y_{ifib}\cdot z_{ifib} & -\sum_{ifib=1}^{n(x)} E^{j}_{ifib}\cdot A_{ifib}\cdot y_{ifib} \\ \sum_{ifib=1}^{n(x)} E^{j}_{ifib}\cdot A_{ifib}\cdot y_{ifib}\cdot z_{ifib} & \sum_{ifib=1}^{n(x)} E^{j}_{ifib}\cdot A_{ifib}\cdot z^{2}_{ifib} & \sum_{ifib=1}^{n(x)} E^{j}_{ifib}\cdot A_{ifib}\cdot z_{ifib} \\ -\sum_{ifib=1}^{n(x)} E^{j}_{ifib}\cdot A_{ifib}\cdot y_{ifib} & \sum_{ifib=1}^{n(x)} E^{j}_{ifib}\cdot A_{ifib}\cdot z_{ifib} & \sum_{ifib=1}^{n(x)} E^{j}_{ifib}\cdot A_{ifib} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Kesitinin yeni tanjant fleksibilite matrisi $(\boldsymbol{f}^{j}(x))$, kesit için yeni tanjant rijitlik matrisinin ters çevrilmiş haliyle elde edilir [19-21].

3 Sayısal çalışma

Bu çalışmada nümerik analizler kapsamında yapı stokunda yoğun bir şekilde yer alan kapalı ağır çıkmaya sahip binaların çerçeve düzensizliği durumu farklı 2 tip betonarme bina modeliyle incelenmiştir. Her iki modelde de kapalı ağır çıkma durumu göz önünde bulundurulmuştur. Model 1 tüm kolonlar arası kirişlerle bağlanarak modellenirken, Model 2 ağır çıkma bulunan çevre kolonlar arasındaki kirişler konsol ucunda olacak şekilde modellenmiştir. Kapalı ağır çıkma bulunan betonarme binalarda çerçeve düzensizliğinin incelenmesi için betonarme kesitler, malzeme özellikleri, donatı konfigürasyonu, statik ve dinamik yükleme durumları her iki modelde de özdeş olarak modellenmiştir. Nümerik analizlerde kullanılan kolon kiriş kesit özellikleri, beton ve çelik için kullanılacak malzeme özellikleri ve betonarme kesitler için donatı detayları gibi parametreler için uygulamada yaygın olarak kullanılan değerler dikkate alınmıştır. Bu parametreler için seçilen değerler aşağıda detaylandırılmaktadır. Nümerik analizlerde her iki betonarme bina modeli de 14.5x14.5 m plan boyutlarında simetrik olarak dikkate alınmıştır. Bina modellerine ait kat planları Şekil 3'te verilmiştir.

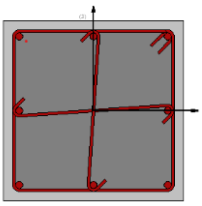


(a) Model 1

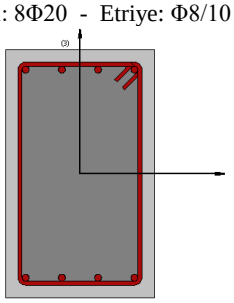
(b) Model 2

Şekil 3. Bina modellerine ait kat planları

Her iki modelde de x ve y doğrultularında bir yönde 1.5m uzunluğunda konsol ağır çıkma yer almaktadır. Betonarme kolonların tamamı için kesit ölçüleri 50x50 cm olarak alınmıştır. Boyuna donatı için 8 adet Φ20 donatı çeliği ve etriyeler için Φ8 donatı çeliği 10 cm aralıklarla kullanılmıştır. Betonarme kiriş ölçüleri ise 30x50 cm olarak alınmış ve 8Φ14 boyuna donatı, Φ8/10 cm etriye donatı konfigürasyonu kullanılmıştır. Modellerde kullanılan betonarme elemanların kesit detayları Şekil 4'te verilmiştir. Beton malzemenin basınç dayanımı 25 MPa, çelik malzemenin akma dayanımı ise 420 MPa olarak hesaba katılmıştır.



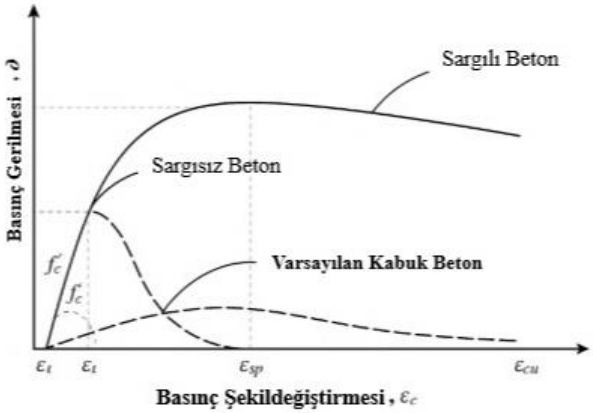
Kolon: 50x50 cm
Donatı: 8Φ20 - Etriye: Φ8/10 cm



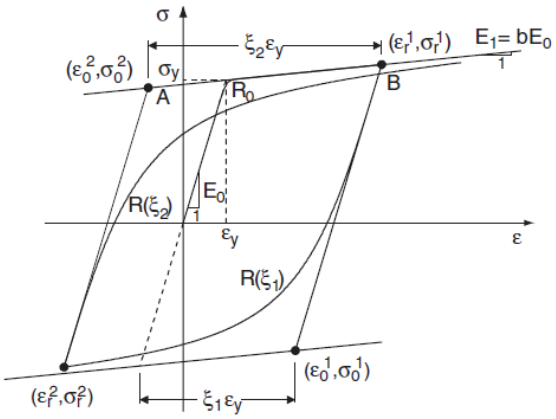
Kiriş boyutları: 30 x 50 cm
Donatı: 8 Φ 14 - Etriye: Φ8/10 cm

Şekil 4. Betonarme elemanların kesit detayları

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler için SeismoStruct programı kullanılmıştır [22]. Betonarme elemanların sonlu eleman çözümleri için kuvvete dayalı fiber eleman yöntemi dikkate alınmıştır. Doğrusal olmayan dinamik analizlerin çözümünde Hilber-Hughes-Taylor entegrasyon algoritması kullanılmış ve α değeri -0.1 olarak dikkate alınmıştır. Sönüm tipi olarak Rayleigh sönümü ile çözümler elde edilmiş ve sönüm oranı ise %5 olarak dikkate alınmıştır. Beton malzemenin doğrusal olmayan davranış modeli için sargı etkisini de dikkate alan Mander modeli kullanılmıştır [23]. Çelik malzemenin doğrusal olmayan davranışı için ise geliştirilmiş Menegotto-Pinto çelik modeli kullanılmıştır [24,25]. Beton ve çelik malzemelerin doğrusal olmayan davranış modelleri Şekil 5'te verilmiştir. Nümerik sonuçlar, kesitlerdeki çelik ve beton liflerin doğrusal olmayan davranışı için tanımlanan malzeme modellerinden etkilenmektedir.



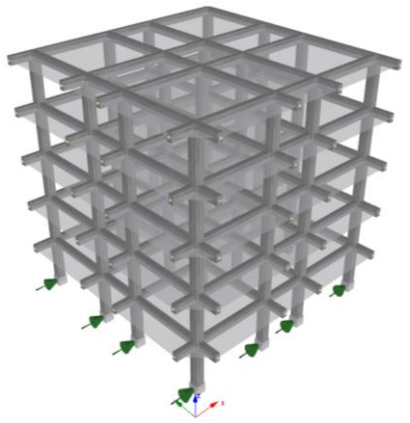
a) Mander-Priestley-Park beton modeli [23]



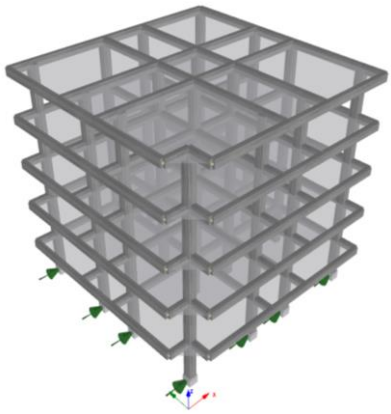
(b) Geliştirilmiş Menegotto-Pinto çelik modeli [25]

Şekil 5. Beton ve çelik malzeme modelleri

Nümerik analizlerde Model 1 de duvar yükleri konsol ucuna ağırlık olarak eklenirken Model 2 de ise kiriş üzerlerine ağırlık olarak etki ettirilmiştir. Döşemeler rijit diyafram olarak dikkate alınmıştır. Oluşturulan modellerin üç boyutlu görünümleri Şekil 6'da verilmiştir.



Model 1



Model 2

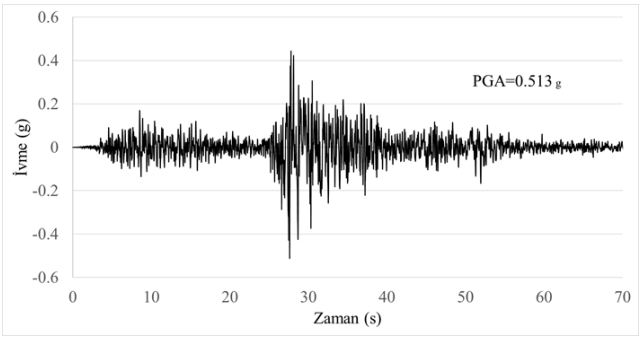
Şekil 6. Bina modellerinin 3 boyutlu görüntüsü

Binaların dinamik özelliklerini belirlemek için öncelikle modal analizler gerçekleştirilmiştir ve elde edilen sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir. Bu tabloda sırasıyla x, y ve z yönleri için deplasman değerleri açısından her bir moda ait kütle katılım oranları yüzde olarak verilmiştir. Modal analiz sonuçlarına göre her iki doğrultu için etkin modal kütle katılım oranları en yüksek olan 2 modun periyod değerleri dikkate alınmıştır. Diğer modların kütle katılım oranları çok düşük olduğundan bu tabloda yer verilmemiştir. Model 1' de 5. ve 6. modun periyod değerleri kullanılırken Model 2' de 3. ve 4. modun periyod değerleri kullanılmıştır.

Tablo 1. Modal analiz sonuçları

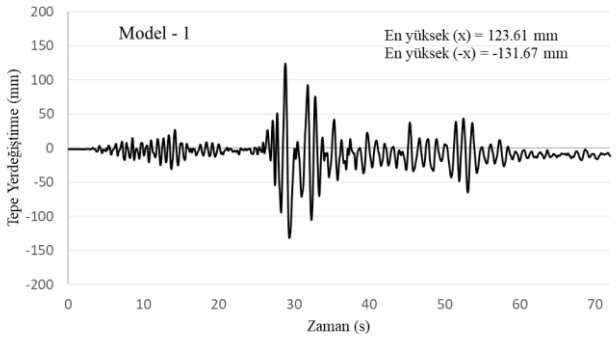
	Mod	Periyot(s)	U_x(%)	U_y(%)	U_z(%)
Model-1	**5**	**0.604**	**40.91**	**40.91**	0.03
	6	**0.601**	**38.11**	**38.11**	0.00
Model-2	**3**	**0.672**	**40.45**	**40.45**	0.05
	4	**0.607**	**27.74**	**27.74**	0.00

Yapının dinamik özellikleri belirlendikten sonra zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Dinamik analizlerde uygulanacak deprem yüklemesi için her iki modelde de Kahramanmaraş-Pazarcık (Mw=7.7) depreminin Türkoğlu istasyonunda doğu-batı doğrultusunda ölçülen ivme kaydı modellerin x yönünde etki ettirilmiştir. Uygulanan depremin pik değeri 0.513g olarak ölçülmüştür ve bu deprem kaydına ait ivme-zaman grafiği Şekil 7'de verilmiştir.

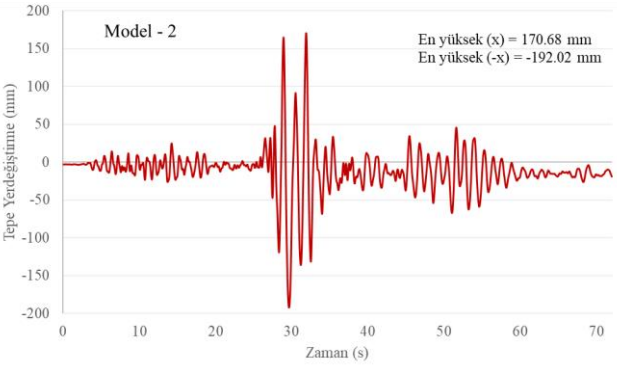


Şekil 7. Kahramanmaraş (Pazarcık) depreminin Türkoğlu istasyonunda ölçülen ivme kaydı (T.C. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2024)

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz sonuçları her iki model için öncelikle tepe yerdeğiştirme değerleri açısından değerlendirilmiştir. Model 1 ve Model 2 için tepe yerdeğiştirme – zaman grafikleri Şekil 8'de verilmiştir. Bu grafiklerden görüldüğü üzere, Model 1 için maksimum tepe yer değiştirme değeri –x yönünde 131.67 mm olarak elde edilirken, Model 2 için bu değer 192.02 mm olarak elde edilmiştir. Bina modellerinin deprem tepkilerinin karşılaştırılması amacıyla, tepe yer değiştirme değerleri, dönme açıları, taban kesme kuvveti ve taban devrilme momenti değerleri karşılaştırmalı olarak Tablo 2'de verilmiştir. Bu tablodan görüldüğü üzere, Model 1 ve Model 2 arasında tepe yer değiştirme değerleri açısından %45.83, dönme değerleri açısından %583.33 mertebelerinde bir artış görülmüştür. Taban kesme kuvveti ve taban devrilme momentleri arasında önemli bir fark gözlemlenmemiştir.



(a) Model 1



(b) Model 2

Şekil 8. Bina modellerine ait tepe yerdeğiştirme – zaman grafikleri

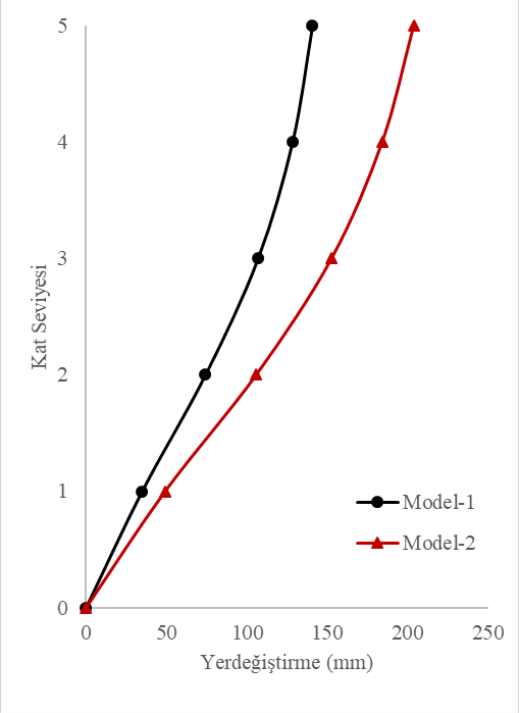
Tablo 2. Deprem tepkilerinin en yüksek değerleri ve bina modelleri arasındaki farklar

	Model 1	Model 2	Maksimum değerler arasındaki farklar
Tepe yerdeğiştirme (x ekseni) (mm)	123.61	170.68	%45.83
	-131.67	**-192.02**	
Dönme (z ekseni) (rad)	0.0011	0.0079	%583.33
	-0.0012	**-0.0082**	
Taban kesme kuvveti (x ekseni) (kN)	3060	2779	%-9.57
	-3333	**-3014**	
Taban devrilme momenti (y ekseni) (kN/m)	6049	6038	%-1.82
	-6310	**-6195**	

Tablo 3. Binaların dört köşe kolonlarından hesaplanan göreli kat yerdeğiştirme değerleri

	Model -1		Model -2		Maksimum değerler arasındaki farklar
	(x) yönü (mm)	(-x) yönü (mm)	(x) yönü (mm)	(-x) yönü (mm)	
1. Kat	29.13	**34.82**	34.90	**49.12**	%41.08
	29.00	34.34	33.23	46.39	
	27.64	30.24	25.13	31.35	
	27.81	30.19	25.23	31.57	
2. Kat	36.60	**39.37**	48.47	**56.61**	%43.81
	36.37	38.95	46.05	54.03	
	34.39	35.66	33.48	37.51	
	34.40	35.65	33.47	37.52	
3. Kat	30.77	**32.67**	45.89	**46.84**	%43.37
	30.49	32.46	43.27	44.50	
	28.51	30.45	29.54	31.87	
	28.53	30.39	29.58	31.78	
4. Kat	19.72	**21.40**	33.78	**31.54**	%47.38
	19.54	21.30	31.99	29.70	
	18.29	20.33	19.33	22.57	
	18.29	20.30	19.34	22.50	
5. Kat	9.94	**12.43**	21.16	**19.62**	%57.85
	9.85	12.38	19.82	18.66	
	9.15	11.96	9.53	14.04	
	9.15	11.95	9.57	13.95	
			ORTALAMA		**%46.70**

Ağır çıkma durumunda olan betonarme binalarda çerçeve sürekliliğinin etkisini gözlemlemek amacıyla her iki modelin burulma davranışı incelenmiştir. Binaların burulma davranışının incelenmesi amacıyla her kat seviyesi için binaların dört köşe kolonlarının üst uç noktalarından göreli yerdeğiştirme değerleri hesaplanmış ve bu değerler her iki model için Tablo 3'te verilmiştir. Her iki modelde de maksimum göreli kat yer değiştirme değerleri –x yönünde meydana geldiğinden bu yöndeki göreli kat yerdeğiştirme değerleri dikkate alınmıştır. Her iki bina modelinde köşe kolonların üst uç noktalarında meydana gelen yerdeğiştirme değerleri her kat seviyesi için karşılaştırmalı olarak Şekil 9'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere Model 2'den elde edilen yer değiştirme değerleri tüm kat seviyeleri için Model 1'den elde edilen yer değiştirme değerlerine göre önemli bir artış meydana gelmiştir. Model 1 ve Model 2 arasında göreli kat yerdeğiştirme değerleri açısından tüm katlarda meydana gelen farklar dikkate alındığında ortalama olarak %46.70 değerinde bir artış elde edilmiştir. Şekil 9 ve Tablo 3 dikkate alındığında ağır çıkma durumunda olan betonarme bir binada çerçeve sürekliliği sağlanmaması durumunda göreli kat yerdeğiştirme değerleri önemli ölçüde artmaktadır. Bina modellerinin sismik tepkilerinin incelenmesi için uygulanan deprem yönünde elde edilen doğrusal hız ve doğrusal ivme değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 9. Kat seviyesi – yerdeğiştirme ilişkisi

Bina modellerinin sismik tepkilerinin incelenmesi için uygulanan deprem yönünde elde edilen doğrusal hız ve doğrusal ivme değerleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca burulma etkilerinin incelenmesi amacıyla açısal hız ve açısal ivme değerleri incelenmiştir. (Tablo 4). Hız ve ivme değerleri incelemelerinde bina modellerinin tepe noktalarından elde edilen değerler dikkate alınmıştır. Model 1 hız ve ivme tepkilerine göre Model 2'den elde edilen tepkilerde açısal ivme değerleri istisna olmak üzere genel olarak bir artış söz konusudur. En yüksek artış açısal hız değerinde %423.19 olarak elde edilmiştir. Doğrusal ivme değerleri arasında ise %23.59'luk bir fark elde edilmiştir. Ağır çıkma bulunan betonarme bina modellerinde çevre akslarda yer alan çerçeve sisteminin düzenli olmaması durumunda doğrusal ivme değerleri önemli ölçüde artmaktadır. Yine bu tip yapılarda, çerçeve sistemi düzenli olan yapıya göre burulma düzensizliğinin bir göstergesi olan açısal hız değeri ise çok yüksek bir oranda artış göstermektedir.

Tablo 4. Hız ve ivme parametreleri için tepe noktasında elde edilen en yüksek değerler ve bina modelleri arasındaki farklar

	Model 1	Model 2	Maksimum değerler arasındaki farklar
Doğrusal hız (x ekseni) (m/s)	0.6554 -1.1804	0.8220 -1.2040	%2.00
Açısal hız (z ekseni) (rad/s)	0.0069 **-0.0069**	0.0332 **-0.0361**	%423.19
Doğrusal ivme (x ekseni) (m/s^2)	4.3336 **-4.1577**	4.1823 **-5.1387**	%23.59
Açısal ivme (z ekseni) (m/s^2)	0.1703 -0.2612	0.2755 -0.2204	-%15.62

Bina modellerinin hasar durumlarının belirlenmesinde TBDY-2018 de yer alan performans hedefleri dikkate alınarak hasar sınırları hesaplanmıştır. Hasar sınırı hesabında beton malzemenin hasar sınırları için sargı etkisi dikkate alınmıştır. Hesaplanan hasar sınırları Tablo 5'te verilmiştir. Bu tabloda ε_c beton malzeme için birim şekil değiştirmeyi ve ε_s ise çelik malzemenin birim şekil değiştirmesini göstermektedir. Belirlenen bu hasar sınır değerlerine göre beton ve çelik için hasarlı kolon ve kiriş eleman sayıları tespit edilmiş ve modellerin en fazla hasar almış görünümleri Şekil 10'da verilmiştir. Bu şekilde kırmızı renk göçmenin önlenmesi hasar sınırına ulaşan elemanları, turuncu renk kontrollü hasar sınırına ulaşan elemanları, yeşil renk ise sınırlı hasar sınırına ulaşan elemanları göstermektedir. Hasarlı model görünümlerinde beton veya çelik malzemeden en yüksek mertebede hasar sınırına ulaşan elemanın en kötü durumu gösterilmektedir. Her iki modelde de hasarların yoğun olarak zemin kat seviyesinde meydana geldiği ve Model 1'e kıyasla, göçmenin önlenmesi hasar sınırına ulaşan eleman sayısının Model 2'de daha fazla olduğu açıkça görülmektedir.

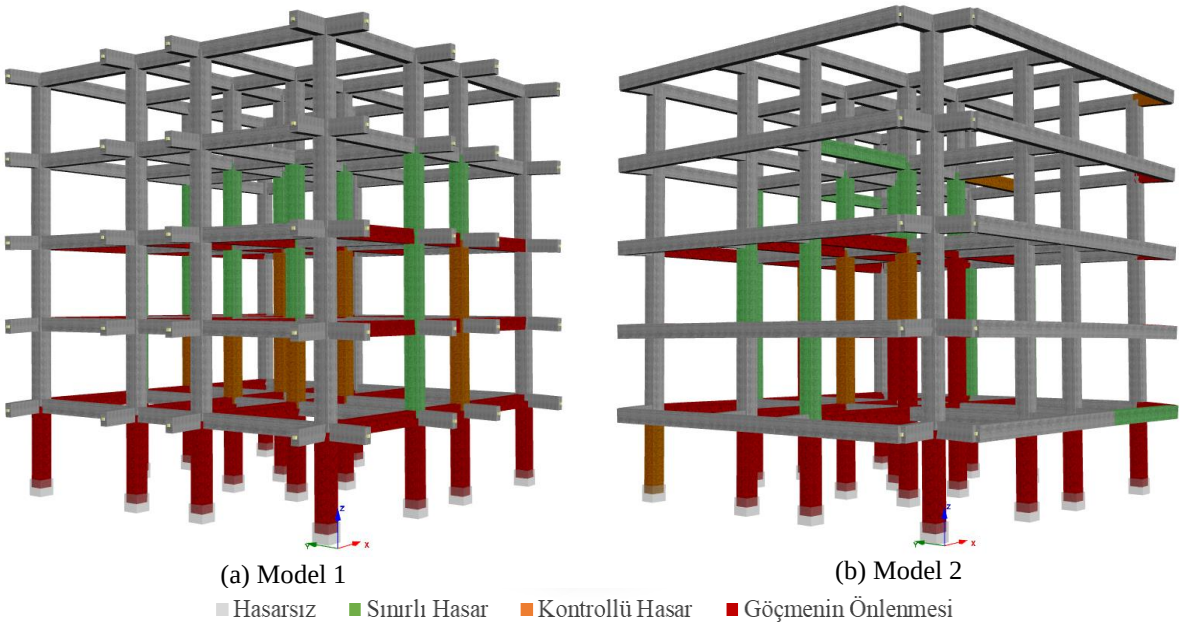
Tablo 5. TBDY-2018'e göre hesaplanan hasar sınır değerleri

	Sınırlı Hasar	Kontrollü Hasar	Göçmenin Önlenmesi
ε_c (Sargılı beton)	0.0025	0.0085	0.0113
ε_c (Sargısız beton)	0.0025	0.0026	0.0035
ε_s (Çelik)	0.0075	0.0240	0.0320

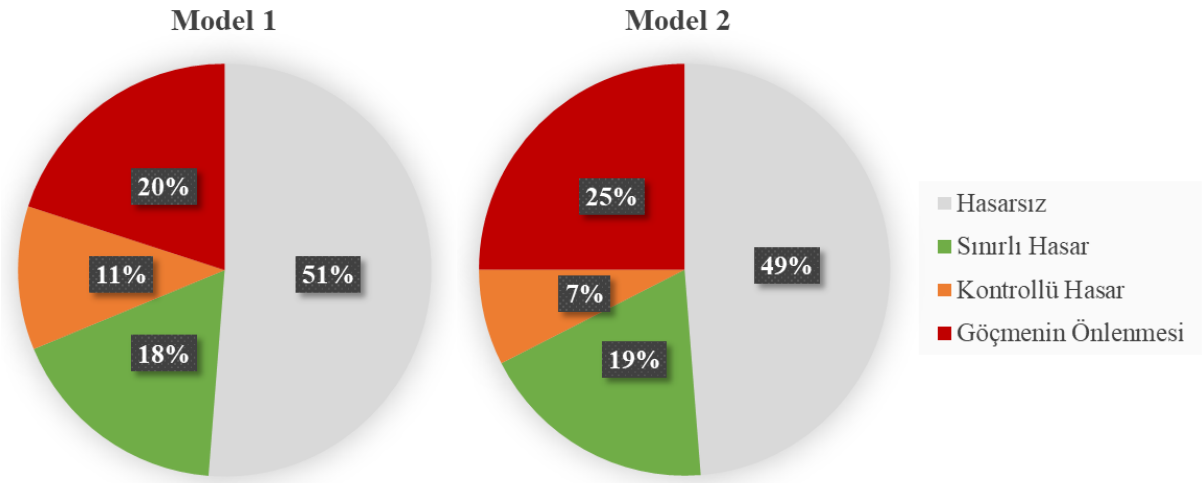
Belirlenen hasar sınırlarına göre bina modelleri için hasarlı kolon ve kiriş eleman sayıları Tablo 6'da verilmiştir. Bu tabloya göre betonarme elemanlardan hiçbirisi çelik malzemenin göçmenin önlenmesi hasar sınır değerlerine ulaşmamıştır. Her iki bina modelinde de hasarların daha çok betonun ezilmesi (ε_c) sebebiyle oluştuğu, donatı akmasından (ε_s) kaynaklı hasarların sınırlı kaldığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla yapısal davranışın baskın olarak beton ezilmesiyle sınırlı kaldığı tespit edilmiştir. Çelik malzemeden kaynaklanan hasarlar incelendiğinde, Model 1 yapısında hiçbir eleman kontrollü hasar seviyesine ulaşmazken Model 2 yapısında 7 adet kolon kontrollü hasar sınırına ulaşmıştır. Ayrıca Model 1 ve Model 2 binaları için sırasıyla 30 ve 19 kolon sınırlı hasar seviyesine ulaşmıştır. Beton malzemenin sınır değerleri incelendiğinde ise Model 1 binasında 16 adet kolon göçmenin önlenmesi sınırını aşarken, Model 2 binasında 20 adet kolon bu sınırı aşmaktadır. Ayrıca, Model 1'de göçmenin önlenmesi hasar sınırına ulaşan kirişlerin toplam kiriş sayısına oranı %60 iken, Model 2'de bu oran %45 seviyelerine ulaşmıştır. Ağır çıkma durumundaki betonarme binalarda çerçeve düzensizliğinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi amacıyla özellikle beton malzemeden kaynaklı hasar sınırına ulaşan kolon eleman sayıları dikkate alınmış ve bu sonuçlar grafik halinde Şekil 11'de verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü üzere Model 1'de göçmenin önlenmesi hasar sınırına ulaşan kolonların toplam kolon sayısına oranı %20 iken Model 2'de bu oran %25 seviyelerine ulaşmıştır.

Tablo 6. Hasarlı eleman sayıları

		Hasarsız		Sınırlı Hasar		Kontrollü Hasar		Göçmenin Önlenmesi		TOPLAM
		M-1	M-2	M-1	M-2	M-1	M-2	M-1	M-2	
Beton (ε_c)	Kolon	41	39	14	15	9	6	16	20	80
	Kiriş	24	28	0	3	0	2	36	27	60
Çelik (ε_s)	Kolon	50	54	30	19	0	7	0	0	80
	Kiriş	36	42	24	18	0	0	0	0	60



Şekil 10. Hasar sınırlarına göre renklendirilmiş bina modelleri



Şekil 11. Hasar sınırlarına göre hasarlı kolon elemanların toplam kolon sayısına oranları

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, ağır çıkma bulunan betonarme binalarda dış çerçeve düzensizliğinin deprem davranışına etkileri incelenmiştir. İki farklı betonarme dış çerçeve sistemi kiriş bağlantıları sağlanarak ve kirişler konsol uçlarında olacak şekilde tasarlanmıştır. Yapıların zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiş ve kuvvete dayalı fiber eleman yöntemi kullanılmıştır. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi etkisi altında incelenen binalar, tepe yerdeğiştirme, dönme, taban kesme kuvveti, taban devrilme momenti, göreli kat yerdeğiştirme, doğrusal hız ve ivme, açısal hız ve ivme değerleri açısından karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda:

- Model 1 ve Model 2 arasında tepe yer değiştirme değerleri açısından %45.83, dönme değerleri açısından %583.33 seviyesinde bir artış görülmüştür.
- Model 1 ve Model 2 arasında göreli kat yerdeğiştirme değerleri açısından tüm katlarda meydana gelen farklar dikkate alındığında ortalama olarak %46.70 değerinde bir artış elde edilmiştir.
- Hız ve ivme tepkileri incelendiğinde Model 1 binasına göre Model 2 binasından elde edilen sonuçlarda genel olarak bir artış söz konusudur. En yüksek artış burulma etkilerini de gösteren açısal hız değerlerinde meydana gelmiştir.
- Hasar durumu incelemelerinde; Model 1'de göçmenin önlenmesi hasar sınırına ulaşan kolonların toplam kolon sayısına oranı %20 iken Model 2'de bu oran %25 seviyelerine ulaşmıştır.

- Model 1'de göçmenin önlenmesi hasar sınırına ulaşan kirişlerin toplam kiriş sayısına oranı %60 iken Model 2'de bu oran %45 seviyelerine ulaşmıştır.
- Her iki modelde de donatılarda göçmenin önlenmesi performans düzeylerine ulaşılmamıştır. Yalnızca Model 2'de 7 adet kolon kontrollü hasar sınırına ulaşmıştır. Ağır çıkma bulunan betonarme binalarda dış çerçeve bağlantılarının konsol uçlarında yapılması betonarme elemanlarda donatı kaynaklı hasarlara da neden olabilmektedir.

Ağır çıkma bulunan betonarme binalarda uygulamada sıklıkla görülen dış çerçeve düzensizliği binanın deprem davranışına olumsuz yönde etki etmektedir. Binanın deprem tepkilerinde, özellikle burulma davranışını gösteren parametrelerde çok yüksek mertebelerde artış görülmüştür ve bu durum deprem sonrası yapılan saha incelemeleriyle doğrulanmaktadır. Ağır çıkma bulunan betonarme binaların tasarımı yapılırken konsol uçlarına yerleştirilen kirişlerden ziyade dış kolonların kiriş ile birbirine bağlanması önerilmektedir. Ağır çıkma bulunan hasarlı veya hasar göreceği nümerik analizlerle doğrulanan mevcut betonarme binalar uygun güçlendirme teknikleriyle güçlendirilmesi gerekmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

[1] O. İnce, Structural damage assessment of reinforced concrete buildings in Adıyaman after Kahramanmaraş (Türkiye) Earthquakes on 6 February 2023. Engineering Failure Analysis, 156, 107799, 2024. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107799.

[2] A. Özmen, O. İnce, Ö. F. Taş, et al., Seismic performance assessment of structures in Malatya Province after 6 February 2023 Turkey earthquake sequences. Natural Hazards, 2024. https://doi.org/10.1007/s11069-024-07017-x.

[3] B. Yön, İ. Ö. Dedeoğlu, M. Yetkin, et al., Evaluation of the seismic response of reinforced concrete buildings in the light of lessons learned from the February 6, 2023, Kahramanmaraş, Türkiye earthquake sequences. Natural Hazards, 121, 873–909, 2025. https://doi.org/10.1007/s11069-024-06859-9.

[4] A. Demir, E. Celebi, H. Ozturk, et al., Destructive impact of successive high magnitude earthquakes occurred in Türkiye's Kahramanmaraş on February 6, 2023. Bull Earthquake Eng 23, 893–919 2025. https://doi.org/10.1007/s10518-024-01865-5

[5] E. Işık, M. Hadzima-Nyarko, D. Radu, and B. Bulajić, Study on effectiveness of regional risk prioritisation in reinforced concrete structures after earthquakes. Applied Sciences, 14(16), 6992. 2024 https://doi.org/10.3390/app14166992

[6] Y. Erbaş, Ö. Mercimek, Ö. Anıl, et al., Design deficiencies, failure modes and recommendations for strengthening in reinforced concrete structures exposed to the February 6, 2023 Kahramanmaraş Earthquakes (Mw 7.7 and Mw 7.6). Nat Hazards 121, 3153–3194 2025. https://doi.org/10.1007/s11069-024-06925-2

[7] J. Yuzbasi, Post-Earthquake Damage Assessment: Field Observations and Recent Developments with Recommendations from the Kahramanmaraş Earthquakes in Türkiye on February 6th, 2023 (Pazarcık M7.8 and Elbistan M7.6). Journal of Earthquake Engineering, 1–26. 2024. https://doi.org/10.1080/13632469.2024.2353864

[8] B. Sevim, Y. Ayvaz, S. Akbulut, M. F. Aydıner, S. Uzun, and A. Ari, Seismic Performance and Damage Evaluation of Reinforced Concrete Structures Based on Field Investigation Made After February 6, 2023, Kahramanmaraş Earthquakes. Journal of Earthquake and Tsunami, 18(1), 2350032, 2024. https://doi.org/10.1142/S179343112350032X

[9] E. Gültepe, H. G. Çömlekoğlu, B. Öztürk, C. Dönmez, Discussion on the Causes of the Observed Damages in the 2023 Kahramanmaraş Earthquakes. In: Uckan, E., Akgun, H., Gok, E., Yenidogan, C. (eds) Proceedings of the 7th International Conference on Earthquake Engineering and Seismology. ICEES 2023. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 488. Springer, Cham, 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-57659-1_6

[10] B. Yon, E. Sayin, Y. Calayir, Z. C. Ulucan, M. Karatas, H. Sahin, K. E. Alyamaç, A. T. Bildik, Lessons learned from recent destructive Van, Turkey earthquakes. Earthquakes and Structures 9(2), 431–453, 2015. https://doi.org/10.12989/eas.2015.9.2.431

[11] E. Işık, F. Akat, The effect of different heavy overhang on structural performance in reinforced concrete structures. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 12(1), 261-271, 2023. https://doi.org/10.17798/bitlisfen.1232889.

[12] H. Sucuoğlu, U. Yazgan, Simple survey procedures for seismic risk assessment in urban building stocks. Seismic Assessment and Rehabilitation of Existing Buildings, 29, 97-118, 2003. https://doi.org/10.1007/978-94-010-0021-5_7

[13] A. Doğangün, Performance of reinforced concrete buildings during the May 1, 2003 Bingöl earthquake in Turkey. Engineering Structures, 26(6), 841-856, 2004. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.02.005

[14] E. Işık, Z. Tozlu, Farklı değişkenler kullanılarak yapı performans puanının hesaplanması. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 4(2), 161-172, 2015. https://doi.org/10.17798/beufen.42155

[15] E. Meral, M. İnel, Düşük ve orta yükseklikteki betonarme binaların yapısal parametre özelliklerinin değerlendirilmesi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 22(6), 468-477, 2016. https://doi.org/ 10.5505/pajes.2016.29291

[16] S. B. Öz, Kapalı Çıkma Düzensizliğinin Betonarme Yapıların Sismik Davranışına Etkilerinin Doğrusal Elastik Olmayan Analizle Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Osmaniye, 2019.

[17] E. Meral, Kapalı çıkmalı betonarme binaların deprem davranışının değerlendirilmesi. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 31(2), 309-318, 2019. https://doi.org/10.35234/fumbd.613265

[18] I. Karki, H. R. Parajuli, Effects of cantilever projections on seismic performances of RC buildings. Journal of Innovations in Engineering Education, 6(1), 110117, 2023. https://doi.org/10.3126/jiee.v6i1.56965.

[19] F. F. Taucer, E. Spacone, F. C. Filippou, A fiber beam-column element for seismic response analysis of reinforced concrete structures. Report No. UCB/EERC-91/17, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, 1991.

[20] M. Karaton, Ö. F. Osmanlı, M. E. Gülşan, Numerical simulation of reinforced concrete shear walls using force-based fiber element method: effect of damping type and damping ratio. Bulletin of Earthquake Engineering, 19(14), 6129-6156, 2021. https://doi.org/10.1007/s10518-021-01221-x.

[21] M. Karaton, Ö. F. Osmanlı, and H. A. Awla, Comparison of ACI-318 and TS-500 codes for nonlinear seismic analysis of RC structures using force-based fiber element approach. Structures 57, 105291, 2023. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105291.

[22] Seismosoft, SeismoStruct 2025 – A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures, 2025. Available from: http://www.seismosoft.com.

[23] J. B. Mander, M. J. N. Priestley, R. Park, Theoretical stress-strain model for confined concrete. Journal of Structural Engineering, 114(8), 1804–1826, 1988. https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339445(1988)114:8(1804).

[24] M. Menegotto, P. E. Pinto, Method of analysis for cyclically loaded RC plane frames including changes in geometry and non-elastic behaviour of elements under combined normal force and bending. Proceedings of IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads, Lisbon, pp. 15–22, 1973. https://doi.org/10.3130/aijt.14.143

[25] K. Kolozvari, T. A. Tran, K. Orakcal, J. W. Wallace, Modeling of cyclic shear-flexure interaction in reinforced concrete structural walls. II: Experimental validation. Journal of Structural Engineering 141(5), 04014136, 2015. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001083

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 1082-1087

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Enhanced hydrogen storage via NaH and GO composites: Structural, morphological and spectroscopic insights

NaH ve GO kompozitleri ile geliştirilmiş hidrojen depolama: Yapısal, morfolojik ve spektroskopik incelemeler

Ali Altuntepe[1,*]

[1] *Optical Excellence Application and Research Center, Sivas University of Science and Technonogy, Sivas, 58000, Türkiye*

Abstract

In this work, a novel composite material composed of NaH and GO was prepared and investigated for hydrogen storage. The composite was prepared using ball milling techniques and was also characterized by Raman spectroscopy, XRD, BET measurements, and SEM. Raman spectroscopy established hydrogenation induced the formation of large defects in the GO matrix and shifts in phonon modes of NaH vibrational modes, establishing structural changes through hydrogen interaction. XRD findings indicated lattice contraction and decrease in crystallite size upon hydrogen absorption, and secondary phases such as NaOH and NaO_2H_3 were also present due to the sensitivity of NaH to environmental oxygen and humidity. BET analysis revealed a surface area of 9.42 m^2/g with an average pore diameter of ≤68.79 nm, and SEM images confirmed a well-dispersed, fractured morphology for hydrogen uptake. Hydrogen storage capacities at 5, 10, and 15 bar showed pressure-dependent behavior, and the composite was observed to achieve a maximum capacity of 1.9 wt% at 15 bar. The interaction between GO and NaH enhances structural stability, surface accessibility, and defect density, making the NaH+GO composite a promising candidate for high-efficiency solid-state hydrogen storage applications.

Anahtar kelimeler: NaH, GO, Hydrogen storage, Ball milling

Öz

Bu çalışmada, NaH ve GO'dan oluşan yeni bir kompozit malzeme hazırlanmış ve hidrojen depolama amacıyla incelenmiştir. Kompozit, bilyalı öğütme (ball milling) yöntemiyle sentezlenmiş ve Raman spektroskopisi, XRD, BET yüzey alanı ölçümleri ve SEM ile karakterize edilmiştir. Raman spektroskopisi, hidrojenleme işleminin GO matrisi içerisinde büyük yapısal kusurlar oluşturduğunu ve NaH'nin titreşim modlarında fonon kaymalarına neden olduğunu, dolayısıyla hidrojen etkileşimiyle yapısal değişimlerin meydana geldiğini ortaya koymuştur. XRD sonuçları, hidrojen absorpsiyonu sonrası kristal örgüsünde daralma ve kristalit boyutunda azalma olduğunu göstermiştir. Ayrıca, NaH'nin çevresel oksijen ve nem hassasiyetinden kaynaklı olarak NaOH ve NaO_2H_3 gibi ikincil fazlara da rastlanmıştır. BET analizine göre, kompozitin yüzey alanı 9.42 m^2/g ve ortalama gözenek çapı ≤68.79 nm olarak belirlenmiştir. SEM görüntüleri, hidrojen alımı için uygun, iyi dağılmış ve kırık morfolojiyi doğrulamıştır. 5, 10 ve 15 bar basınçlarda yapılan hidrojen depolama testlerinde, basınca bağlı bir davranış gözlemlenmiş ve kompozitin 15 bar'da maksimum %1.9 ağırlıkça hidrojen depolama kapasitesine ulaştığı belirlenmiştir. GO ve NaH arasındaki sinerjik etkileşim, yapısal kararlılığı, yüzey erişilebilirliğini ve kusur yoğunluğunu artırarak, NaH+GO kompozitini yüksek verimli katı hâl hidrojen depolama uygulamaları için umut vadeden bir malzeme haline getirmiştir.

Keywords: NaH, GO, Hidrojen depolama, Bilyalı değirmen

1 Introduction

Hydrogen, the lightest and simplest element in the universe, contains only a proton and an electron [1]. Hydrogen is not found free in nature but is ubiquitous as compounds like water, a condition of life, and hydrocarbons, basic fuels of the contemporary world. Hydrogen, due to its extremely high energy density of nearly three times that of petroleum, possesses a highly immense ability to fulfill future energy requirements. Nevertheless, a number of issues are still present in achieving an economy based on hydrogen, the storage of hydrogen being one of the greatest hurdles. Storage in high-pressure containers [2] and cryogenic storage [3], although technologically possible, are not well suited for everyday vehicular use because of their low energy densities and attendant safety issues. Consequently, a lot of research has gone into creating solid-state materials that can reversibly store hydrogen safely and efficiently.

NaH possesses a crystalline structure composed of sodium ions (Na^+) and hydride ions (H^-). In hydrogen storage applications, sodium hydride is notable for its ability to absorb and release hydrogen gas. NaH is widely used in chemical synthesis as a Brønsted base and readily reacts with various Brønsted acids. However, it rarely behaves as if it delivers the hydride to polar π electrophiles in a direct

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: altuntepeali@gmail.com (A. Altuntepe)
Geliş / Received: 24.04.2025 Kabul / Accepted: 16.06.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1681889

manner. This unique behavior makes NaH an intriguing compound among metal hydrides [4]. The main challenges in the commercialization of NaH as a hydrogen storage material are its high reactivity and hygroscopic nature. NaH is also a strong base and can readily react with various substances. Nevertheless, ongoing research is focused on developing new methods for the safe handling and storage of NaH to overcome these limitations. Sodium hydride-based hydrogen storage systems have diverse applications in the field of energy storage and transport. In particular, they hold promise for use in vehicles and renewable energy systems, where they can be integrated with hydrogen fuel cells to help address the challenges of energy storage and distribution.

Hydrogen storage as chemical bonding or surface adsorption on carbonaceous materials is more safe, as it typically requires controlled energy input to evolve the stored hydrogen [5]. This intrinsic stability has stimulated keen interest in the research and development of emerging storage technologies. Among the many directions that have been explored, metal hydrides, chemical hydrides, and high-performance carbon nanostructures have been at the forefront [6]. In particular, these kinds of materials like activated carbon, carbon nanotubes, and carbon nanofibers have been intensively investigated due to their high surface areas and controllable porosity. Although earlier research has reported enormous hydrogen adsorption in these carbon materials, experimental findings have resulted in enormous discrepancies. Storage capacities vary by several orders of magnitude between different experiments, and the very high ones reported in a few papers have resisted replication in highly controlled laboratory conditions, their validity and utility questionable.

In the case of defected graphene, metal atoms tend to remain closer to the substrate and exhibit stronger binding energies compared to those on pristine graphene. This behavior is primarily attributed to the presence of single-vacancy defects, which play a role in mitigating the aggregation of transition metal atoms. Such defects enable the distribution of individual metal atoms across the graphene surface, potentially creating multiple isolated catalytic or adsorption sites across a wide nanosheet [7-8]. Conversely, even on defect-free graphene, transition metals can enhance hydrogen adsorption due to electronic effects such as charge transfer and resonance interactions induced by the metal atoms. These interactions lead to an increased polarization of hydrogen bonds, potentially resulting in dipole-dipole attractions. Overall, non-pristine graphene whether through structural defects or surface functionalization exhibits stronger hydrogen interactions [9, 10]. However, the suppression of metal clustering through defect engineering remains limited, as clustering tendencies often re-emerge despite defect-induced stabilization.

Carbon additives such as CNTs or carbon blacks were shown to improve the hydrogen sorption kinetics of complex hydrides such as $NaAlH_4$ or MgH_2 by nanoconfinement or catalytic processes [2], our composite is the first one to demonstrate that even simple ball-milling of NaH with GO (graphene oxide) can create extensive defects, shifts in the phonons, and enhanced pressure-sensitive storage capacity (up to 1.9 wt% at 15 bar). Particularly, I_D/I_G ratio alteration from 0.89 to 1.41 and reduction of crystallite size (from 3.64 to 3.34 nm) demonstrate the formation of defect sites and microstrain in GO-NaH matrix processes consistent with hydrogen-induced lattice distortion and interfacial polarization accounted for by Adelhelm et al [7]. Also, Na's intercalation capability in defective carbon structures, already observed in NaH/C compounds, will likely be responsible for the described synergistic uptake behavior [7]. Different from previous work where carbon served as a dispersant or a scaffold at best, this work represents combined efforts from defect engineering, phonon mode softening, and microstructural stabilization—the three inextricably linked facets required in the design of functional solid-state hydrogen storage systems.

In this study, a GO+NaH (1:1) composite material is prepared to examine its prospect in hydrogen storage applications. GO has garnered vast research attention due to its vast surface area, reversible chemistry, and rich oxygen content of oxygenated functional groups that facilitate metal hydride particles' dispersion and anchoring with high efficiency. In contrast, NaH is known for having high hydrogen content and high reactivity but limited practical application due to safety issues and its propensity for aggregation. Incorporating NaH into GO is suggested as a means to transcend these disadvantages based on synergistic interaction between the two substances. This strategy targets the improvement of the stability, dispersibility, and hydrogen adsorption performance of NaH, which might have implications for the more efficient hydrogen storage solid-state systems.

2 Material and method

In this study, the Hummers method was employed as the basis for the synthesis of GO. Initially, a specified amount of sulfuric acid (H_2SO_4) and 0.2 g of potassium permanganate ($KMnO_4$) were added into a 100 mL beaker and stirred for 30 minutes. Subsequently, graphite powder was added to the mixture, and stirring continued. The process proceeded with the addition of distilled water, at which point the resulting mixture turned a dark brown color. During synthesis, the temperature of the mixture was critical and was maintained at approximately 4°C using an ice bath. In the next step, hydrogen peroxide (H_2O_2) was added, and the color of the mixture turned light yellow. The resulting mixture was filtered, dried at room temperature, and the dried product was re-dispersed in distilled water. This solution was subjected to sonication for several hours to exfoliate the graphite oxide layers, thereby yielding GO. After filtration, the product was washed sequentially with distilled water and methanol and then dried at 70°C to obtain GO.

To prepare NaH and GO composites, ball milling was performed. Steel balls of 6.4 mm and 3.2 mm diameter were used for the ball milling process to create the desired compositions. The rotation speed of the ball mill was set to 500 rpm to ensure effective friction and breakdown between the powder and the balls. The milling chamber and the balls were maintained at 20°C during grinding. Ball milling was performed for a total of 30 min in order to achieve good

dispersion and particle size reduction of NaH. The treatment was carried out in an argon (Ar) controlled environment to prevent unwanted oxidation or hydrolysis due to the high reactivity and hygroscopicity of NaH.

A finless reactor (100 mL), made of St. 42 steel, was used as the hydrogen storage reactor. To evacuate moisture and air from the reactor, a vacuum of up to 10^{-2} Torr was applied using a vacuum pump. Additionally, a thermal treatment (annealing at 200°C for 15 minutes) was conducted with a heating plate to remove any remaining moisture and organic contaminants inside the reactor. Argon gas was used to inert the inside of the reactor to ensure complete removal of moisture. The hydrogen used for storage had a purity of 99.9999%. For the hydrogen storage process, the powdered samples were exposed to 5, 10, and 15 bar H_2 pressure for 30 minutes. This allowed for the diffusion of H_2 into the materials and completion of the hydrogen storage process. To enhance the hydrogen activation rate, this procedure will be repeated four times. The pressure values were determined based on literature and the gas output capacity of the current regulator [11, 12]. Initially, all experimental parameters were carried out at room temperature. Hydrogen storage capacity measurements were performed using a custom-built volumetric setup equipped with an Alicat Scientific mass flow controller (MFC, model: Alicat MC Series) to precisely regulate and monitor hydrogen gas flow during pressurization. The system also included a calibrated pressure transducer (range: 0–20 bar, resolution: ±0.01 bar) and a stainless steel reactor chamber designed to withstand hydrogen environments. Before each measurement, the chamber was evacuated to 10^{-2} Torr using a rotary vacuum pump and purged multiple times with 99.999% pure argon to ensure an inert atmosphere. Flow regulation by the Alicat MFC ensured consistent hydrogen delivery, while the reactor temperature and pressure were continuously monitored. All measurements were repeated in triplicate for statistical validation and reproducibility. The structural, morphological, and surface characteristics of the NaH+GO composites were examined using Raman spectroscopy, X-ray diffraction (XRD), Brunauer–Emmett–Teller (BET) analysis, and scanning electron microscopy (SEM). Raman spectroscopy was employed to identify structural defects, phonon mode shifts, and hydrogen-induced changes in the GO matrix and NaH structure.

3 Result and discussion

Raman spectroscopy was used to investigate the structural change and hydrogen interaction behavior of the as-prepared NaH+GO and hydrogenated NaH+GO (H-NaH+GO) composites. The corresponding Raman spectra are presented in Figure 1. Two regions were investigated: the low-frequency region for the vibration modes of NaH and the higher-frequency region for the graphene oxide carbon skeleton. Two intense bands at ~1340 cm^{-1} and ~1600 cm^{-1} in both spectra are due to the D-band and G-band of graphene oxide, respectively [13, 14]. The D-band represents structural disorder and defects in the sp^2 carbon lattice, while the G-band is attributed to the E_{2g} vibrational mode of sp^2-bonded carbon atoms. For NaH+GO composite, D and G bands are observed at approximately 1350 cm^{-1} and 1620 cm^{-1} in Figure 1 with an intensity ratio (I_D/I_G) of ~0.89, indicating a moderate disorder in the GO structure. There are significant changes in the spectrum of H-NaH+GO upon hydrogen absorption. The D and G band positions shift to 1329 cm^{-1} and 1578 cm^{-1}, respectively. More importantly, the I_D/I_G ratio increases to ~1.41, revealing a considerable defect density enhancement of the GO lattice. This is a result of the disruption of the carbon network by hydrogen incorporation, which creates more sp^3 hybridized regions and localized distortions. The broadening of the G-band in the H-NaH+GO spectrum also supports the occurrence of hydrogenation-induced structural deformation within the carbon matrix. Two Raman bands from NaH vibrational modes at 250 cm^{-1} and 1100 cm^{-1} are observed for the NaH+GO composite in the low-frequency region [15]. With hydrogen absorption, these peaks are marginally shifted to 258 cm^{-1} and 1115 cm^{-1}, respectively. These redshifts are consistent with literature-reported phonon softening effects caused by hydrogen absorption, which disturb the local vibrational environment of the sodium hydride lattice. It is concluded that the incorporation of hydrogen into the structure of NaH influences diffusion paths of Na^+ ions believed to be along major crystallographic directions ([100], [010], and [001]) and induces minor structural reorganization on the atomic scale [16]. These findings collectively demonstrate that both the GO matrix and the NaH component are significantly modified through exposure to hydrogen.

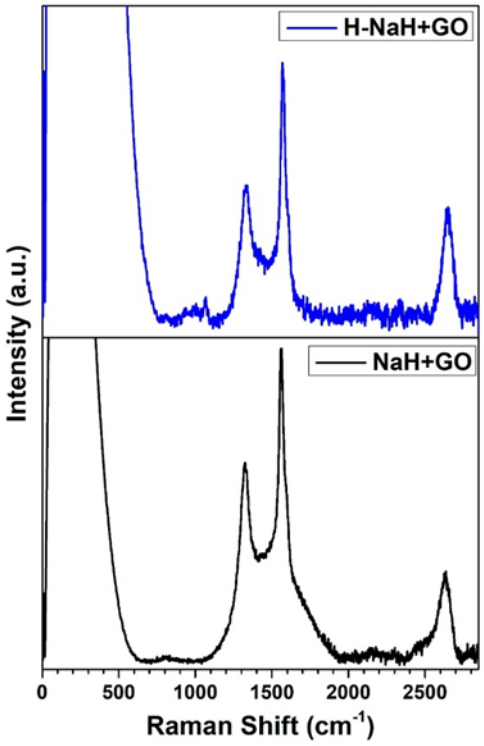


Figure 1. Raman spectra of NaH+GO (bottom, black) and H-NaH+GO (top, blue) composites

The GO framework is made more defective, with potential enhancement of hydrogen adsorption capacity, and the NaH lattice is modified at the phonon level, consistent with the incorporation of hydrogen. These synergistic effects show that the NaH+GO composite system is viable for enhanced hydrogen storage applications, in which both adsorption and defect-enhanced desorption mechanisms can be engaged. The XRD patterns of the synthesized NaH+GO and H-NaH+GO composites are presented in Figure 2. Distinct peaks in both samples confirm the presence of crystalline phases, including NaH, NaOH, NaO_2H_3, and carbon, as well as the structural changes occurring after hydrogenation. In the NaH+GO composite (black curve), the main diffraction peaks corresponding to NaH are observed at $2\theta = 31.8°$, 36.9°, 78.6°, respectively (JCPDS 98-002-8557). Additional reflections at 15.78°, 30.37°, 36.23°, 38.27°, 43.4°, 44.6°, 48.2° are assigned to NaOH phases (JCPDS 98-003-8557), while peaks at 14.87°, 33.5°, and 39.75° are indexed to NaO_2H_3 phases (JCPDS 98-002-8557). These compounds are known by products due to the high reactivity of NaH with ambient moisture and oxygen.

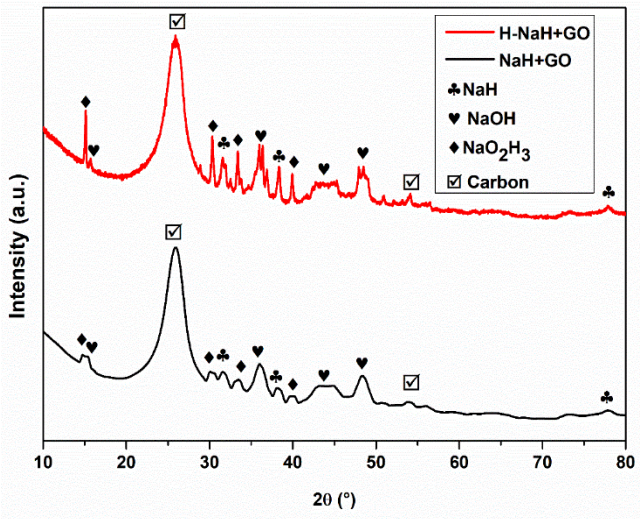


Figure 2. XRD patterns of NaH+GO (black) and H-NaH+GO (red) composites

The presence of characteristic carbon peaks ($2\theta = 10.43°$) in both composites confirms the structural contribution of GO. After hydrogenation, the H-NaH+GO sample (red curve) exhibits similar phase peaks, yet notable shifts in diffraction peak positions are observed. For instance, the NaH (111) peak shifts from 31.8° to 31.90°, indicating a decrease in interplanar spacing (d-spacing) from 3.5 Å to 3.3 Å, attributed to hydrogen incorporation into the NaH lattice. Additionally, peak broadening and intensity changes are evident, reflecting increased lattice disorder and reduced crystallite size from 3.64 nm in NaH+GO to 3.34 nm in H-NaH+GO. These changes suggest that hydrogenation induces structural strain, point defects, and possible changes in grain boundaries, all of which influence ion diffusion behavior [17]. The formation of structural defects is particularly important in hydrogen storage applications. These defects can act as diffusion pathways or trap sites for hydrogen, thereby influencing both hydrogen absorption and desorption kinetics [18]. The observed modifications in the crystal lattice, including peak shifts and broadening, underscore the importance of hydrogen-induced lattice dynamics in enhancing storage performance.

The surface area and porosity characteristics of the NaH+GO composite were investigated using the BET technique. As shown in Figure 3, the nitrogen adsorption–desorption isotherms and pore size distribution curves reveal critical insights into the structural features of the synthesized material. The specific surface area of the NaH+GO sample was found to be $9.42 m^2/g$, with a corresponding average pore size of approximately ≤68.79 nm. These results suggest that the incorporation of GO and the mechanical ball milling of NaH particles effectively increased the surface area compared to commercial NaH powders, as reported in previous studies [19]. Moreover, the presence of GO likely contributes to additional surface development due to its high surface-to-volume ratio and layered structure. This increase in surface area and pore accessibility is highly beneficial for hydrogen storage applications, as it promotes faster hydrogen diffusion and provides more sites for adsorption or chemical bonding. These textural modifications play a crucial role in improving the kinetic behavior and reversible storage capacity of the NaH+GO composite.

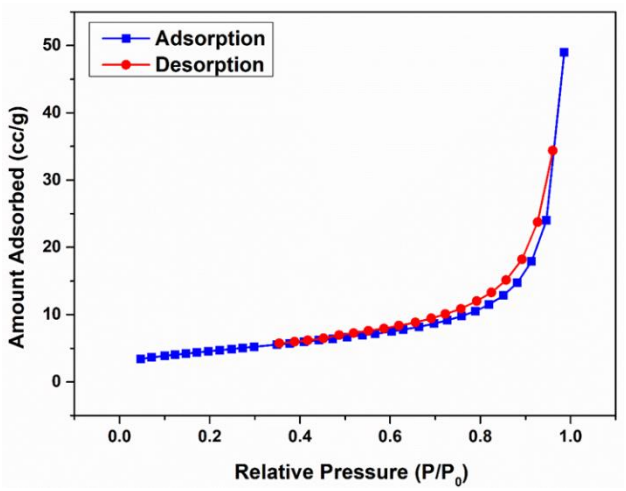


Figure 3. BET analysis of NaH+GO composite

The surface and particle morphology of the composite NaH+GO was examined with a SEM at different magnifications, respectively, and shown in Figure 4 (a-b). The micrographs display important information regarding the effect of ball milling and GO addition on the structural features of the composite. At 10,000× magnification, the NaH+GO particles have irregular block-like morphologies with fragmented and rough surfaces. The texture represents particle deformation and fracture, as expected due to the mechanical stress undergone during milling. The presence of nanoscale surface features suggests a high concentration of active surface sites that will be helpful for hydrogen adsorption and chemical reactivity. The lower magnification view (1, 000×) is a more even particle distribution over a larger area. The particles appear to be well dispersed with

reduced agglomeration, which is essential for even hydrogen diffusion and enhanced kinetics. There are also some rod-shaped and bigger clusters, which could be residual graphite or agglomerated NaH domains.

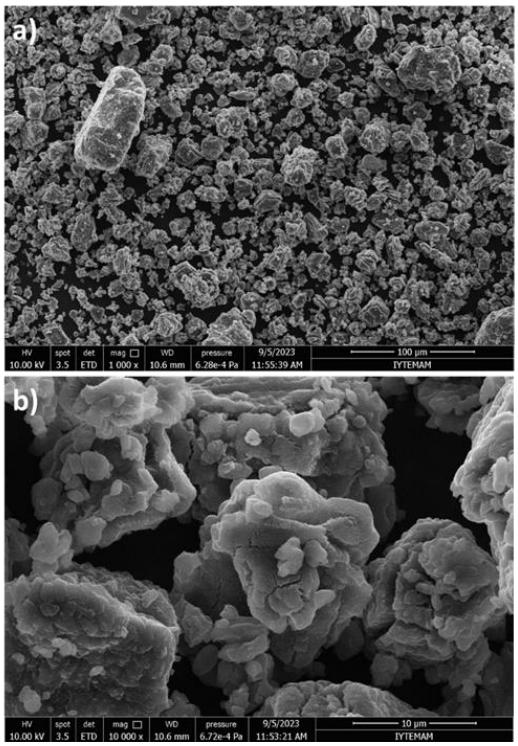


Figure 4. SEM images of NaH+GO composite at (a) 1000× and (b) 10000× magnifications

The capacity for hydrogen storage in NaH+GO composite was measured at pressures of 5, 10, and 15 bar, and values are given in Figure 5. The enhancement of hydrogen uptake is consistent with pressure, thus establishing the pressure-dependent behavior of the absorption process. For a pressure of 5 bar, hydrogen storage capacity was 1.6 wt%. Raising the pressure to 10 bar raised the storage capacity to 1.8 wt%, indicating additional hydrogen adsorption and, most likely, partial hydride formation. A further increase of the pressure to 15 bar resulted in a slight but definite rise, with a storage capacity of 1.9 wt%. The slight rise suggests that the material is very close to saturation at pressure levels above 15 bar with the experimental conditions used. This observed trend is owing to the synergy between GO that provides additional surface area, defects sites, and prevents agglomeration of particles and NaH, high-affinity hydrogen material. Increased diffusion of hydrogen is enhanced, as well as improved accessibilities to active sites, owing to synergy. Also reflecting in its modest value increase from 10 to 15 bar, a sign is presented that the easily accessible majority sites are saturated by 10 bar and extra increase in pressure simply improves marginally the hydrogen uptake. These results indicate that the NaH+GO composite exhibits promising hydrogen storage capacity even at relatively low to moderate pressures and is a potential candidate for practical solid-state hydrogen storage systems.

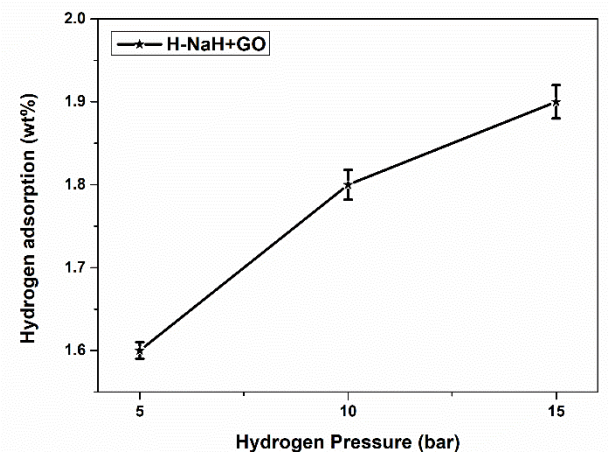


Figure 5. Hydrogen storage capacities of NaH+GO composite at different pressures

4 Conclusion

In this work, the hydrogen storage characteristic of NaH+GO composite material was investigated by structural and spectroscopic analyses prior to and after hydrogenation. The inert atmosphere-synthesized ball-milled composite with 1:1 weight ratio exhibited superior structural change upon hydrogen exposure. Raman spectroscopy showed an increase in I_D/I_G ratio, an indicator of defect formation, while XRD analysis showed changes in the peaks and reduction in crystallite size, which are evidences of lattice strain and structural distortion. The highest hydrogen storage capacity was found to be 1.9 wt% at 15 bar, which is evidence of the efficiency of the GO-supported NaH system. The results show GO inhibits not just particle agglomeration but also surface activation and the formation of defects with enhanced hydrogen uptake. These observations signal the potential of NaH+GO composites as solid-state hydrogen storage materials and set the stage for the optimization of composition and process parameters.

Similarity (iThenticate): 4%

References

[1] M. R. Usman, Hydrogen storage methods: Review and current status. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 167, 112743, 2022. https://doi.org/10.1016/j.rs er.2022.112743.

[2] M. Zhang, H. Lv, H. Kang, W. Zhou, C. Zhang, A literature review of failure prediction and analysis methods for hydrogen storage tanks. International Journal of Hydrogen Energy, 44, 25777–25799, 2019. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.028.

[3] S. Bosu, N. Rajamohan, Recent advancements in hydrogen storage—Comparative review on methods, operating conditions and challenges. International Journal of Hydrogen Energy, 52, 352–370, 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.005.

[4] P. C. Too, G. H. Chan, Y. L. Tnay, H. Hirao, S. Chiba, Hydride reduction by NaH–iodide composite. Angewandte Chemie International Edition, 55,3719–3723, 2016. https://doi.org/10.1002/anie.201600305.

[5] Y. Yürüm, A. Taralp, T. N. Veziroğlu, Storage of hydrogen in nanostructured carbon materials. International Journal of Hydrogen Energy, 34, 3784–3798, 2009. https://doi.org/10.10 16/j.ijhydene. 2009.03.001.

[6] Y. Liu, W. Zhang, X. Zhang, L. Yang, Nanostructured light metal hydride: Fabrication strategies and hydrogen storage performance. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 184, 113560, 2023. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113560.

[7] P. Adelhelm, The impact of carbon materials on the hydrogen storage properties of light metal hydrides. Journal of Materials Chemistry, 21, 2417–2427, 2011. https://doi.org/10.1039/C0JM02593C.

[8] H. G. Shiraz, O. Tavakoli, Investigation of graphene-based systems for hydrogen storage. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 74, 104–109, 2017. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.052.

[9] D. S. L. Abergel, V. Apalkov, J. Berashevich, K. Ziegler, Properties of graphene: A theoretical perspective. Advances in Physics, 59, 2010. https://doi.org/10.1080/00018732.2010.487978.

[10] Z. Ao, S. Dou, Z. Xu, Hydrogen storage in porous graphene with Al decoration. International Journal of Hydrogen Energy, 39, 16244–16251, 2014. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.08.013.

[11] M. Kayfeci, F. Bedir, Metal Hidrür Esaslı Hidrojen Depolama Reaktör Dizaynı ve Hidrojen Şarj Basıncı Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi. Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 34, 83–91, 2014. https://dergipark.org.tr/tr/pub/isibted/issue/33969/375 975.

[12] C. H. Chen, T. Y. Chung, C. C. Shen, M. S. Yu, C. S. Tsao, G. N. Shi, Hydrogen storage performance in palladium-doped graphene/carbon composites. International Journal of Hydrogen Energy, 38, 2013. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.070.

[13] R. Krishna, E. Titus, O. Okhay, J. C. Gil, J. Ventura, E. V. Ramana, Rapid electrochemical synthesis of hydrogenated graphene oxide using Ni nanoparticles. International Journal of Electrochemical Science, 9, 4054–4069, 2014. https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)08073-2.

[14] R. Zan, A. Altuntepe, Nitrogen doping of graphene by CVD. Journal of Molecular Structure, 1199, 127026, 2020. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.127026.

[15] T. Marqueño, I. Osmond, P. Dalladay-Simpson, A. Hermann, R. T. Howie, High pressure study of sodium trihydride. Frontiers in Chemistry, 2024. https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1306495.

[16] T. Famprikis, H. Bouyanfif, P. Canepa, M. Zbiri, J. A. Dawson, E. Suard, Insights into the rich polymorphism of the Na^+ ion conductor Na_3PS_4 from the perspective of variable-temperature diffraction and spectroscopy. Chemistry of Materials, 33, 5652–5667, 2021. https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.1c01113.

[17] A. Altuntepe, S. Çelik, R. Zan, Optimizing hydrogen storage and fuel cell performance using carbon-based materials: Insights into pressure and surface area effects. Hydrogen, 6, 22, 2025. https://doi.org/10.3390/hydrogen6020022.

[18] S. Singh, S. W. H. Eijt, Hydrogen vacancies facilitate hydrogen transport kinetics in sodium hydride nanocrystallites. Physical Review B, 78, 224110, 2008. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.78.224110.

[19] Y. Fan, W. Li, Y. Zou, S. Liao, J. Xu, Chemical reactivity and thermal stability of nanometric alkali metal hydrides. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 8, 935–942, 2006. https://doi. org/10.1166/jnn.2008.033.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 1088-1099
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
Araştırma makalesi / Research article
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Fırında pişirilen patates kızartmalarında akrilamid oluşumunun optimize edilmiş gauss süreç regresyonu ile modellenmesi

Modeling acrylamide formation in oven-baked French fries using optimized gaussian process regression

Eşref Boğar[1,*], Damla Nur Kaya[2], Deniz Kaynar[3], Büşra Braho[4], Melek Harmancı[5]

[1,2,3,4] *Pamukkale Üniversitesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, 20160, Denizli Türkiye*
[5] *BSH Ev Aletleri Sanayi ve Ticaret AŞ, İstanbul Türkiye*

Öz

Yüksek düzeyde akrilamid maruziyeti, genotoksik ve potansiyel olarak kanserojen etkiler göstermekte olup, insan sağlığı açısından ciddi bir risk unsuru olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle, gıda ürünlerinde akrilamid oluşumunun kontrol altına alınması, gıda güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, ev tipi fırında pişirilen patates kızartmalarında pişirme sıcaklığı ve süresinin akrilamid oluşumu üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiş ve bu parametrelerin akrilamid oluşumu ile ilişkisi modellenmiştir. Farklı pişirme koşullarında ölçülen akrilamid düzeyleri 94.78 µg/kg ile 1070.67 µg/kg arasında değişmiş, sıcaklık ve süredeki artışın akrilamid oluşumunu artırdığı gözlemlenmiştir. Modelleme sürecinde, hiperparametre optimizasyonu oransal–integral–türevsel tabanlı arama algoritmasıyla gerçekleştirilen Gauss süreç regresyon modeli önerilmiştir. Önerilen modelin performansı, çok değişkenli doğrusal, etkileşimli, basit karesel, karesel, Gauss, logaritmik ve üstel regresyon modelleriyle karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, önerilen modelin deneysel verileri en yüksek doğrulukla temsil ettiğini ortaya koymuştur. Bu model, kök ortalama kare hata (RMSE) değeri 56.90 ve determinasyon katsayısı (R^2) değeri 0.97 ile diğer modellere kıyasla üstün bir performans sergilemiştir. Ayrıca, Avrupa Birliği tarafından belirlenen 500 µg/kg'lık referans değer esas alınarak, sıcaklık ve süre kombinasyonlarına bağlı potansiyel sağlık riski haritalandırılmıştır. Bu çalışma, akrilamid oluşumunu azaltmaya yönelik etkili stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlamakta ve gıda güvenliği ile halk sağlığının korunmasına yönelik önemli bilgiler sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Akrilamid, Fırınlanmış patates, Gauss süreç regresyonu, Gıda güvenliği, Halk sağlığı

Abstract

High levels of acrylamide exposure exhibit genotoxic and potentially carcinogenic effects and are considered a serious risk factor for human health. Therefore, controlling acrylamide formation in food products is of great importance for ensuring food safety. In this study, the effects of cooking temperature and time on acrylamide formation in oven-baked French fries were experimentally investigated, and the relationship between these parameters and acrylamide formation was modeled. Acrylamide levels measured under different cooking conditions ranged from 94.78 µg/kg to 1070.67 µg/kg, and it was observed that increases in temperature and time led to higher acrylamide formation. In the modeling process, a Gaussian process regression model, with hyperparameters optimized using a proportional–integral–derivative-based search algorithm, was proposed. The performance of the proposed model was compared with multivariate linear, interaction, simple quadratic, quadratic, Gaussian, logarithmic, and exponential regression models. The findings revealed that the proposed model represented the experimental data with the highest accuracy. This model demonstrated superior performance compared to other models, with a root mean square error (RMSE) value of 56.90 and a coefficient of determination (R^2) value of 0.97. Additionally, based on the reference value of 500 µg/kg established by the European Union, the potential health risk was mapped according to the combinations of temperature and time. This study contributes to the development of effective strategies to reduce acrylamide formation and provides important insights into ensuring food safety and protecting public health.

Keywords: Acrylamide, Oven-baked French fries, Gaussian process regression, Food safety, Public health

1 Giriş

Akrilamid, yüksek sıcaklık ve düşük nem koşullarında gerçekleştirilen ısıl işlemler sırasında bazı gıdalarda oluşan bir kimyasal bileşiktir [1, 2]. Özellikle kızartma, fırınlama ve kavurma işlemleri sırasında, karbonhidrat bakımından zengin gıdalarda (başta patates, kahve ve tahıl bazlı ürünler) serbest amino asitler ile indirgen şekerler arasında gerçekleşen Maillard reaksiyonu sonucu meydana gelmektedir [3, 4].

Akrilamid oluşumunun en yaygın ve kabul gören mekanizması, Maillard reaksiyonudur. Bu reaksiyon, özellikle glikoz ve fruktoz gibi indirgen şekerlerle asparajin aminoasidi arasında, düşük su aktivitesi ve yüksek sıcaklık koşullarında gerçekleşmektedir [5]. Maillard reaksiyonu

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ebogar@pau.edu.tr (E. Bogar)
Geliş / Received: 09.05.2025 Kabul / Accepted:17.06.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1696315

sırasında, asparajin ile indirgen şekerler arasındaki ilk reaksiyon sonucunda Schiff bazı oluşur; bu yapı dekarboksilasyon yoluyla dekarboksile Amadori ürününe dönüşür ve ardından Strecker bozunması ile akrilamid oluşumu gerçekleşir [6, 7]. Ayrıca, lipid, karbonhidrat ve amino asitlerin ayrışması sonucu oluşan akrolein veya akrilik asit yoluyla da akrilamid oluşumu meydana gelebilmektedir [8, 9]. Bunlara ek olarak, malik, laktik ve sitrik asit gibi organik asitlerin su veya karboksil grubunun kaybıyla ve amino asitlerden doğrudan akrilamid oluşabileceği belirtilmektedir [10].

Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı (IARC), gıdalarda bulunan akrilamidi "İnsanlar İçin Grup 2A Olası Kanserojen" olarak sınıflandırmıştır [11]. Avrupa Komisyonu ise akrilamidi genotoksik ve nörotoksik bir bileşen olarak değerlendirmekte olup, potansiyel bir insan kanserojeni olarak sınıflandırmaktadır [12]. Ayrıca çeşitli çalışmalarda, akrilamide uzun süreli maruziyetin sağlık üzerinde farklı olumsuz etkilerle de ilişkilendirildiği bildirilmiştir [6, 13-16]. Bu nedenle, gıdalarda akrilamid oluşumunun azaltılması, potansiyel sağlık risklerinin önlenmesi ve halk sağlığının korunması açısından büyük önem taşımaktadır.

Literatürde, gıdalarda akrilamid oluşumunu azaltmaya yönelik çeşitli tekniklerle çalışmalar yapılmıştır. Bu teknikler arasında proses koşullarının optimizasyonu [17], haşlama [18, 19], enzimatik işlem [20], maya fermantasyonu [21], ultrason uygulaması [22], darbeli elektrik alan kullanımı [23], katkı maddesi ilavesi [24], ışınlama [25] ve diğer çeşitli stratejiler [4, 26–30] yer almaktadır. Akrilamid oluşumuna etki eden başlıca faktörler arasında proses koşulları, gıdanın bileşimi, pH seviyesi, su aktivitesi, katkı maddeleri, pişirme yöntemi, ön işleme uygulamaları, hammaddenin yetiştirilme koşulları ve depolama koşulları yer almaktadır [31-34]. Özellikle sıcaklık ve süre gibi proses koşulları, akrilamid oluşumunu etkileyen en önemli faktörlerdir [35, 36]. Bu faktörlerin uygun şekilde ayarlanması, akrilamid oluşumunun engellenmesi veya yavaşlatılması için en temel strateji olup, düşük maliyet, zaman verimliliği ve uygulanabilirlik açısından önemli avantajlar sağlamaktadır.

Optimum proses koşullarının belirlenebilmesi için öncelikle süreç değişkenleri ile akrilamid oluşumu arasındaki ilişkinin doğru ve hassas bir şekilde modellenmesi gerekmektedir. Literatürde bu amaçla çeşitli modelleme yaklaşımları önerilmiştir. Bu yaklaşımlar arasında en yaygın kullanılanlardan bazıları, Yanıt Yüzey Yöntemi (Response Surface Methodology, RSM) kapsamında değerlendirilen etkileşimli ve ikinci dereceden (karesel) regresyon modelleridir [17, 19, 37-40]. Ayrıca, Chen vd. [41] sıcaklık ve süre değişkenlerine karşılık akrilamid oluşumunu modellemek amacıyla doğrusal, basit karesel (parabolik), Gauss ve Lorentzian olmak üzere dört farklı çok değişkenli regresyon yöntemini kullanmışlardır. Bu klasik regresyon yaklaşımları, basitlik ve uygulama kolaylıkları nedeniyle yaygın olarak kullanılsa da çoklu parametrelerin karmaşık etkileşimlerini doğru bir şekilde modelleme ve tahmin etme konusunda zaman zaman sınırlamalar gösterebilmektedir [42]. Bu nedenle, Makine Öğrenmesi teknikleri, özellikle Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Networks, ANN), Destek Vektör Regresyonu (Support Vector Regression, SVR) ve Gauss Süreç Regresyonu (Gaussian Process Regression, GPR) gibi yöntemler, karmaşık etkileşimlerin modellenmesinde daha başarılı sonuçlar verebilmesinden dolayı popülerlik kazanmışlardır [43]. Bu tekniklerin kullanımı, verinin büyüklüğü ve karmaşıklığına bağlı olarak farklı avantajlar sunmaktadır. ANN ve SVR büyük veri setlerinde yüksek modelleme ve tahmin performansı gösterirken, GPR özellikle küçük veri setlerinde sağladığı güçlü performans, esneklik ve belirsizlik modelleme kabiliyetiyle öne çıkmaktadır [44-46].

Literatürdeki bu bulgular ışığında, bu çalışma kapsamında ev tipi fırında pişirilen patates kızartmalarında sıcaklık ve sürenin akrilamid oluşumu üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiş ve bu faktörler ile akrilamid oluşumu arasındaki ilişki modellenmiştir. Sınırlı sayıda deneysel veri elde edilebildiğinden, modelleme aşamasında GPR yöntemi kullanılmıştır. Bu yönüyle, akrilamid oluşumunun GPR ile modellenmesi literatürde bir ilk olup, çalışmanın yenilikçi yönlerinden biridir. Ayrıca, GPR'de hiperparametre optimizasyonu için genellikle gradyan tabanlı optimizasyon algoritmaları kullanılmaktadır. Ancak, bu algoritmalar başlangıç değerine aşırı bağımlı olması ve yerel optimuma takılma gibi dezavantajlara sahiptir [47, 48]. Bu nedenle, bu çalışmada hiperparametre optimizasyonu için global arama yeteneğine sahip ve birçok meta-sezgisel algoritmaya göre performansı kanıtlanmış PID tabanlı arama algoritması (PID-based search algorithm, PSA) kullanılmıştır. PSA'nın GPR hiperparametrelerinin optimizasyonunda ilk kez uygulanması, çalışmanın bir diğer özgün katkısını oluşturmaktadır. Ek olarak, Avrupa Birliği tarafından belirlenen referans değerler dikkate alınarak sıcaklık ve süre faktörlerine bağlı olarak akrilamid miktarının sağlık açısından haritalandırılması, çalışmanın diğer önemli katkılarından biridir. Bu çalışmanın bulguları; gıda üreticileri, halk sağlığı yetkilileri, tüketiciler ve fırın üreticileri gibi farklı paydaşlara yönelik bilgiler sunmakta ve halk sağlığının korunmasına yönelik stratejilere katkı sağlamaktadır.

2 Materyal ve metot

2.1 Deneysel süreç

Bu çalışmada, pişirme süresi ve sıcaklığı olmak üzere iki bağımsız değişken ele alınmıştır. Her bir değişken için üç farklı seviye belirlenmiş olup, kullanılan değişkenler ve seviyeleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan değişkenler ve seviyeleri

Değişken	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Süre (dakika)	20	30	40
Sıcaklık (°C)	180	200	220

Deneysel çalışma, tam faktöriyel deney tasarımı çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Her iki değişkenin üç seviyesinin tüm olası kombinasyonları kullanılarak toplam dokuz farklı deney koşulu oluşturulmuştur. Deneylerde tutarlılığı sağlamak ve standardizasyonu korumak amacıyla, endüstriyel ölçekte üretilmiş dondurulmuş parmak patates

(SuperFresh) kullanılmış ve tüm numuneler aynı üretim partisinden olacak şekilde temin edilmiştir. Ürünün 100 gramındaki besin öğeleri Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Çalışmada kullanılan ürünün besin öğeleri (100 g için)

Besin öğesi	Miktar (g)
Yağ	3,5
Doymuş yağ	1,5
Karbonhidrat	28
Protein	2,0
Tuz	0,6

Her bir deney koşulunda 500 g patates örneği, 66 L iç hacme sahip, mekanik ısı kontrolü bulunan elektrikli ankastre fırında; sıcak hava modunda, önceden ısıtılmış fırının üçüncü raf seviyesine yerleştirilen ızgara tepsisi üzerinde pişirilmiştir. Pişirme işlemi, üretici kullanım kılavuzunda belirtilen yerleşim ve çalışma koşullarına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Pişirme işlemleri sırasında patatesler tek katman halinde yerleştirilmiş, ek yağ kullanılmamış ve önceden çözdürme işlemi uygulanmamıştır.

Akrilamid analizleri, Radix/Denise Özel Gıda Kontrol Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen hizmet alımı kapsamında, LC-MS/MS yöntemi ile yapılmıştır. Uygulanan analiz prosedürü, Rufián-Henares ve Morales [49] tarafından geliştirilen metoda dayanmaktadır. %95 güven aralığında elde edilen analiz sonuçları doğrultusunda, her bir deney koşuluna karşılık gelen akrilamid değerleri belirlenmiş ve dokuz farklı pişirme koşuluna ait giriş-çıkış veri kümesi oluşturulmuştur.

2.2 Modelleme süreci

Bu bölümde, öncelikle modelleme sürecinde kullanılan Gauss Süreç Regresyonu yöntemi ve hiperparametre optimizasyonunda kullanılan PID tabanlı arama algoritması açıklanmıştır. Daha sonra, önerilen PSA-GPR yaklaşımı ayrıntılı olarak sunulmuştur.

2.2.1 Gauss süreç regresyonu

Gauss Süreç Regresyonu (Gaussian Process Regression, GPR), parametrik olmayan yapısı sayesinde doğrusal olmayan ve karmaşık ilişkileri modellemede yüksek başarı gösteren, güçlü bir makine öğrenmesi yöntemidir [50-53]. Belirli bir fonksiyonel forma ihtiyaç duymadan veriye esnek şekilde uyum sağlayabilmesi ve modelleme sürecinde belirsizlikleri nicel olarak ifade edebilmesi, GPR'yi özellikle küçük örneklem boyutuna sahip, gürültülü ya da eksik veriler içeren sistemler için etkili bir seçenek hâline getirmektedir [54]. Bu avantajları sayesinde GPR; yanıt yüzeyi modelleme [55], dinamik süreçlerin modellenmesi [56], sistem tanılaması [57] ve zaman serisi analizi [58] gibi farklı uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

GPR, gözlemlenen veriler ile bilinmeyen hedef fonksiyon arasındaki ilişkiyi olasılıksal yaklaşımla ifade etmektedir. Bu yöntemde, giriş uzayındaki bir x girdisine karşılık gelen çıktı y, Denklem (1)'de gösterildiği şekilde ifade edilir [59].

$$y = f(x) + \varepsilon \tag{1}$$

Burada $f(x)$ bilinmeyen hedef fonksiyon, $\varepsilon \sim \mathcal{N}(0, \sigma_\varepsilon^2)$ ise sıfır ortalama ve σ_ε^2 varyansa sahip normal dağılmış gözlem gürültüsünü temsil etmektedir.

GPR kapsamında $f(x)$ fonksiyonu, bir Gaussian süreç (GP) ile modellenir ve bu fonksiyon Denklem (2) şeklinde ifade edilir [60].

$$f(x) \sim GP(m(x), k(x, x')) \tag{2}$$

Burada $m(x)$ ortalama fonksiyonunu, $k(x, x')$ ise iki giriş arasındaki benzerliği tanımlayan çekirdek (kernel) fonksiyonunu ifade eder. Literatürde çeşitli çekirdek fonksiyonları bulunmakla birlikte, kare üstel (squared exponential) fonksiyon, yüksek genelleme yeteneği ve çok çeşitli uygulamalarda gösterdiği başarılı performans nedeniyle en yaygın olarak kullanılan çekirdek fonksiyonlarından biridir [61]. Bu çalışmada da söz konusu avantajları nedeniyle kare üstel çekirdek fonksiyonu tercih edilmiş olup, fonksiyonel ifadesi Denklem (3)'te verilmiştir.

$$k(x, x') = \sigma_f^2 \exp\left(-\frac{\|x - x'\|^2}{2l^2}\right) \tag{3}$$

Bu eşitlikte σ_f^2 sinyal varyansı, l ise karakteristik uzunluk (length-scale) parametresini temsil etmektedir. Bu çekirdek fonksiyonu kullanılarak, $X = [x_1, x_2, \cdots, x_n]^T \in \mathbb{R}^{n \times d}$ ve bunlara karşılık gelen gözlem çıktıları $y = [y_1, y_2, \cdots, y_n]^T \in \mathbb{R}^n$ olmak üzere, kovaryans matrisi $K \in \mathbb{R}^{n \times n}$ Denklem (4) kullanılarak hesaplanır.

$$K_{ij} = k(x_i, x_j), \quad \forall i, j = 1,2, \cdots, n \tag{4}$$

Yeni bir test girdisi $x_* \in \mathbb{R}^d$ verildiğinde, bu girdiye karşılık gelen tahmini çıktı (beklenen değer) $\bar{y}_*$ ve ilgili belirsizlik (varyans) σ_*^2, sırasıyla Denklem (5) ve Denklem (6)'da tanımlanmıştır [62].

$$\bar{y}_* = k_*^T (K + \sigma_\varepsilon^2 I)^{-1} y \tag{5}$$

$$\sigma_*^2 = k(x_*, x_*) - k_*^T (K + \sigma_\varepsilon^2 I)^{-1} k_* \tag{6}$$

Bu denklemlerde $k_* \in \mathbb{R}^n$, test girdisi ile tüm eğitim verileri arasındaki kovaryansları içeren vektörü temsil etmekte olup, Denklem (7) ile ifade edilir.

$$k_* = [k(x_*, x_1), k(x_*, x_2), \ldots, k(x_*, x_n)]^T \tag{7}$$

Modelin performansını belirleyen hiperparametreler olan σ_ε^2, σ_f^2 ve l doğrudan tahmin doğruluğunu etkilemektedir. Bu nedenle bu hiperparametrelerin optimize edilmesi, modelin güvenilirliği ve genellenebilirliği açısından büyük önem taşımaktadır.

2.2.2 PID tabanlı arama algoritması

PID tabanlı arama algoritması (PID-based search algorithm, PSA), 2023 yılında Gao [63] tarafından

geliştirilen, popülasyon tabanlı bir meta-sezgisel optimizasyon algoritmasıdır. Bu algoritma, artırımlı Oransal-İntegral-Türevsel (Proportional-Integral-Derivative, PID) kontrol stratejisinden esinlenerek tasarlanmıştır. PSA, PID kontrol mekanizmasının hata geri besleme prensibini kullanarak arama sürecini yönlendirir ve global optimum çözümün bulunmasını hedefler. Algoritmanın etkinliği, çeşitli karmaşık test fonksiyonları ve farklı gerçek dünya problemleri üzerinde gerçekleştirilen çalışmalarla doğrulanmıştır [63-69].

Genel olarak PSA, popülasyondaki her bir bireyi/çözümü sistemin ölçülen değeri olarak kabul ederken, önceki iterasyonlarda elde edilen en iyi çözümü ise hedef yani referans değer olarak değerlendirir. PID kontrol mekanizmasının hata geri besleme prensibi doğrultusunda, her bireyin mevcut konumu ile en iyi çözüm arasındaki sapma iteratif olarak düzenlenir. Bu süreç aracılığıyla popülasyonun zamanla global optimuma doğru yönlendirilmesi amaçlanmaktadır. PSA'nın matematiksel modeli aşağıda sunulmaktadır.

PSA optimizasyon sürecine, çözüm uzayı içinde rastgele bir popülasyon üreterek başlar. Bu başlangıç popülasyonu, Denklem (8) kullanılarak oluşturulur [63].

$$X_{ij} = l_j + r(u_j - l_j), \quad \begin{cases} i = 1,2,\dots,N \\ j = 1,2,\dots,D \end{cases} \tag{8}$$

Bu denklemde X_{ij} i. bireyin j. boyuttaki konumunu, $r \in (0,1)$ düzgün dağılımlı rastgele bir sayıyı ifade etmektedir. Ayrıca, N popülasyon büyüklüğünü, D problemin boyutunu (değişken sayısını), l_j ve u_j ise sırasıyla j. değişkenin alt ve üst sınırlarını göstermektedir.

Başlangıç popülasyonunun oluşturulmasının ardından, PSA algoritmasında popülasyon güncellemeleri iteratif bir süreç boyunca $(t = 1,2,\cdots,T)$ gerçekleştirilir. Burada, T algoritmanın bir giriş parametresi olup maksimum iterasyon sayısını temsil etmektedir. Popülasyon güncellemesi, sistemdeki sapmalara dayalı bir PID düzenleme mekanizması kullanılarak yapılır. Bu bağlamda, t. iterasyondaki PID düzenleyicisinin çıkış değeri ΔU^t Denklem (9) ile hesaplanır [63].

$$\Delta U^t = K_p r_1 [E_0^t - E_1^t] + K_i r_2 E_0^t + K_d r_3 [E_0^t - 2E_1^t + E_2^t] \tag{9}$$

Bu denklemde K_p, K_i ve K_d sırasıyla oransal, integral ve türev katsayılarını temsil etmekte olup kullanıcı tarafından girilmesi gereken PSA'ya özgü parametrelerdir. Ayrıca, r_1, r_2 ve r_3 eleman değerleri 0 ile 1 arasında olan rastgele oluşturulan vektörlerdir. E_0^t, E_1^t ve E_2^t, t. iterasyondaki sistem sapmalarını ifade etmekte olup, Denklemler (10)-(12) ile iteratif olarak güncellenir.

$$E_0^t = X_*^{t-1} - \mathrm{X}^{t-1}, \quad t \geq 1 \tag{10}$$

$$E_1^t = \begin{cases} E_0^t & t = 1 \\ E_0^{t-1} + X_*^t - X_*^{t-1} & t > 1 \end{cases} \tag{11}$$

$$E_2^t = \begin{cases} E_0^t, & t = 1 \\ E_1^{t-1}, & t > 1 \end{cases} \tag{12}$$

Bu denklemlerde X_*^t ve X_*^{t-1} sırasıyla t. ve $(t-1)$. iterasyonlar boyunca elde edilen en iyi çözümleri temsil etmektedir.

Ayrıca, algoritmanın yerel optimuma sıkışmasını önlemek ve keşif yeteneğini artırmak için bu mekanizmaya "sıfır çıkış" adı verilen bir koşullandırma faktörü eklenmiştir. Sıfır çıkış (O^t), Denklem (13) ile hesaplanmaktadır [63]:

$$O^t = \left(\cos\left(1 - \frac{t}{T}\right) + \tau RL\right) E_0^t \tag{13}$$

Burada R elemanları 0 ile 1 arasında düzgün dağılımlı rastgele sayılardan oluşan $N \times D$ boyutunda bir matristir. L ise Levy uçuş fonksiyonunu ifade etmekte olup, Denklem (14) ile tanımlanmaktadır.

$$L = \frac{U\varphi}{|V|^{1/\lambda}}; \quad \varphi = \left[\frac{\Gamma(1+\lambda)\sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right)^{1/\lambda}}{\Gamma\left(\frac{1+\lambda}{2}\right)\lambda 2^{\frac{\lambda-1}{2}}}\right] \tag{14}$$

U ve V normal dağılımlı rastgele sayılardan oluşan matrislerdir; $\Gamma(.)$ Gamma fonksiyonunu işaret etmektedir ve λ ise değeri 1.5 olarak ayarlanmış bir sabittir.

Denklem (13)'te τ bir ayarlama faktörüdür ve iteratif olarak Denklem (15)'te gösterildiği şekilde hesaplanır.

$$\tau = \left(\frac{\ln(T - t + 2)}{\ln(T)}\right)^2 \tag{15}$$

Son olarak, mevcut popülasyon, ΔU^t ve O^t değerlerine bağlı olarak Denklem (16) kullanılarak güncellenmektedir [63].

$$X^{t+1} = X^t + \eta \Delta U^t + (1 - \eta) O^t \tag{16}$$

Bu denklemde X^{t+1} güncellenmiş popülasyonu temsil etmektedir ve burada ki η vektörü Denklem (17) kullanılarak güncellenir.

$$\eta = r_5 \cos\left(\frac{t}{T}\right) \tag{17}$$

Burada r_5, elemanları 0 ve 1 aralığında düzgün dağılımlı olan bir satır vektördür. Bu mekanizma sayesinde PSA, iterasyonların erken aşamalarında keşif odaklı çalışırken, ilerleyen aşamalarda daha fazla sömürü odaklı hale gelmektedir.

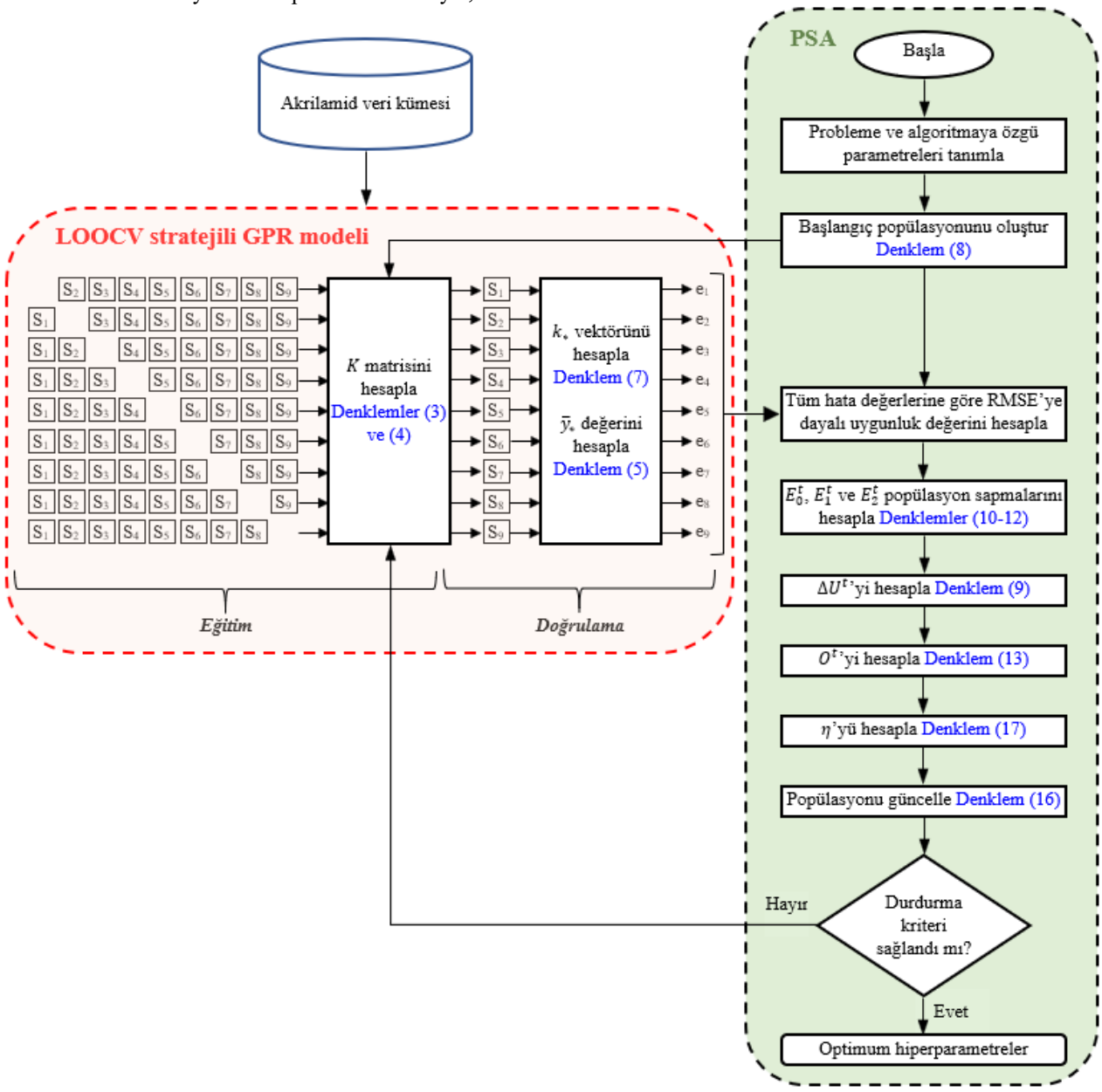
2.2.3 Önerilen PSA-GPR modeli

Akrilamid oluşumunun modellenmesinde, hiperparametreleri PID tabanlı arama algoritması (PSA) ile optimize edilen Gauss süreç regresyonu (GPR) modeli önerilmiştir. Bu kapsamda geliştirilen model, PSA-GPR olarak adlandırılmıştır. GPR modeli, daha önce ifade edildiği

üzere, σ_ε^2, σ_f^2 ve l olmak üzere üç hiperparametreye sahiptir. Bu hiperparametrelerin uygun biçimde belirlenmesi, modelin genelleme performansı ve tahmin doğruluğu açısından belirleyici bir rol oynamaktadır.

Bu çalışmada, söz konusu hiperparametrelerin optimizasyonu için bir meta-sezgisel algoritma olan PSA kullanılmıştır. Ayrıca, modelin aşırı öğrenme eğilimini azaltmak ve genelleme yeteneğini güvenilir biçimde değerlendirebilmek adına birini dışarıda bırak çapraz doğrulama (Leave-One-Out Cross Validation, LOOCV) stratejisi benimsenmiştir. LOOCV, her bir gözlemi sırasıyla test/doğrulama verisi olarak dışarda bırakarak, geri kalan veriyle modelin yeniden eğitildiği bir çapraz doğrulama yaklaşımıdır. Özellikle örnek sayısı sınırlı veri kümelerinde, model performansını değerlendirmek için sıkça tercih edilen bir yaklaşımdır [70, 71]. Bu bağlamda, çalışmada kullanılan veri setinin sınırlı örnek sayısına sahip olması nedeniyle, bu çapraz doğrulama yaklaşımının tercih edildiğini belirtmekte fayda vardır.

Şekil 1'de PSA algoritması kullanılarak GPR modelinin hiperparametrelerinin optimize edildiği sürecin ayrıntılı akış şeması sunulmuştur. Bu süreç, LOOCV stratejisiyle yapılandırılmış GPR modeli ile PSA algoritmasının hiperparametre arama mekanizmasından oluşan iki bileşenden oluşmaktadır. İlk bileşende, GPR modeli LOOCV kapsamında eğitim ve doğrulama adımlarına tabi tutulmaktadır. Her bir döngüde bir gözlem doğrulama amacıyla dışarıda bırakılır, kalan gözlemlerle model eğitilir ve dışarıda bırakılan gözlem üzerinde tahmin hatası (e_i) hesaplanır. Elde edilen tüm hata değerleriyle hata karelerinin ortalamasının karekökü (Root Mean Square Error, RMSE) hesaplanır ve bu RMSE değeri, PSA algoritmasında ilgili aday çözümün uygunluk değeri olarak kullanılır.



Şekil 1. GPR modelinin PSA ile hiperparametre optimizasyonunun akış şeması

İkinci bileşende, PSA algoritması, rastgele oluşturulmuş bir başlangıç popülasyonunun oluşturulmasıyla optimizasyon sürecine başlar. Her bir aday çözüm, GPR modelinin hiperparametreleri olan σ_ε^2, σ_f^2 ve l ile temsil edilmektedir. PSA, her iterasyonda tahmin hatalarına dayalı RMSE'yi minimize etmeye çalışmaktadır. Her iterasyonda uygunluk değerleri yeniden hesaplanarak popülasyon güncellenmekte ve bu süreç, belirlenen durdurma kriteri sağlanana kadar devam etmektedir. Son iterasyonun ardından elde edilen en iyi çözüm, optimum hiperparametre kombinasyonunu temsil eder ve bu parametrelerle nihai GPR modeli oluşturulur. Son aşamada, tüm veri seti ve optimize edilmiş hiperparametreler kullanılarak akrilamid oluşumu modellenir.

3 Bulgular ve tartışma

Çalışma kapsamında farklı pişirme koşullarının akrilamid oluşumu üzerindeki etkileri deneysel olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, hem sıcaklığın hem de pişirme süresinin artmasının akrilamid seviyelerinde belirgin bir yükselişe neden olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle 220°C'de 40 dakika pişirme süresi, en yüksek akrilamid seviyesinin ölçüldüğü koşul olmuştur. Bu sonuçlar, sıcaklık ve sürenin akrilamid oluşumu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve doğrusal olmayan bir ilişkiyle akrilamid seviyelerinin değiştiğini ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, Gökmen vd. [1], Matthäus vd. [35], Tepe ve Kadakal [72], Michalak vd. [73] ve Lu vd. [74] tarafından yapılan çalışmalarda da patates ürünlerinde akrilamid oluşumunun pişirme sıcaklığı ve süresindeki artışa bağlı olarak arttığı rapor edilmiştir. Bu durum, sıcaklığın artmasıyla Maillard reaksiyonunun hızlanması ve ara ürünlerin, özellikle asparajin ile indirgen şekerlerin, daha hızlı reaksiyona girerek akrilamid oluşumunu artırması; pişirme süresinin ise bu reaksiyonların devam etmesine ve akrilamid birikimine olanak sağlamasıyla açıklanabilir [75]. Ayrıca, literatürde akrilamid oluşumunun sıcaklık ve süreye bağlı olarak doğrusal olmayan bir biçimde değiştiği çeşitli çalışmalarda da belirtilmiştir [76-78].

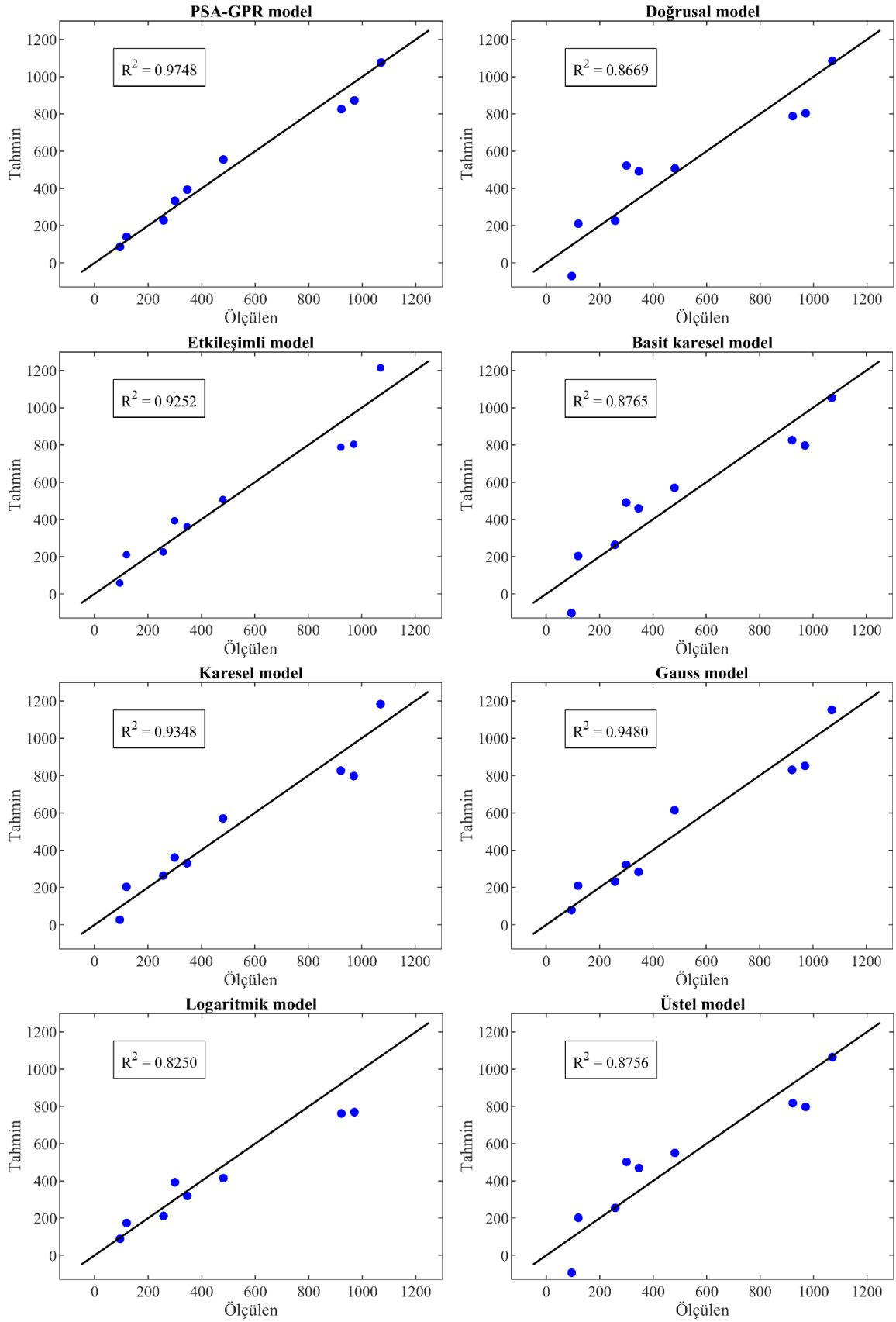
Sıcaklık ve süre faktörlerinin akrilamid oluşumu üzerindeki etkileri, önerilen PSA-GPR modeli kullanılarak modellenmiştir. Bu modelin hiperparametrelerinin belirlenmesinde kullanılan PSA algoritmasında, popülasyon büyüklüğü 50 ve maksimum iterasyon sayısı 1000 olarak belirlenmiştir. Algoritmaya özgü diğer parametreler ise orijinal çalışmada önerilen değerlere dayalı olarak tanımlanmıştır. Önerilen yaklaşımın performansını değerlendirmek amacıyla çok değişkenli doğrusal, etkileşimli, basit karesel, karesel, Gauss, logaritmik ve üstel regresyon modelleriyle karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu kapsamda, ölçülen akrilamid değerleri ile modeller tarafından tahmin edilen değerler karşılaştırmalı olarak Şekil 2'de sunulmuştur. Şekildeki siyah düz çizgi (regresyon çizgisi) gözlemlenen ve tahmin edilen değerler arasındaki ideal uyumu temsil ederken, bu çizgilerden sapmalar modelin hata payını yansıtmaktadır. Şekil 2 incelendiğinde, önerilen PSA-GPR modelinin, akrilamid oluşumunu diğer modellere kıyasla daha yüksek doğrulukla modellediği ve deneysel verileri daha iyi temsil ettiği gözlemlenmektedir.

Bu görsel değerlendirmeye ek olarak, modellerin performansına ilişkin kök ortalama kare hata (RMSE) ve belirleme katsayısı (R^2) değerleri Tablo 3'te sunulmuştur. RMSE, modelin tahminlerinde yaptığı hataların ortalama büyüklüğünü ifade ederken; R^2, bağımlı değişkendeki toplam varyansın ne kadarının modeldeki açıklayıcı değişkenler tarafından açıklandığını göstermektedir [79]. Bir modelin üstün sayılabilmesi için genellikle hataların küçüklüğü (daha düşük RMSE) ve açıklama gücünün yüksekliği (daha yüksek R^2) temel kriterlerdir. Çünkü daha düşük RMSE, modelin tahminlerinin gerçek değerlere daha yakın olduğunu; daha yüksek R^2 ise modelin verideki varyasyonu daha iyi açıkladığını gösterir. Tablo 3'te görüldüğü gibi, önerilen PSA-GPR modeli diğer regresyon modellerine kıyasla hem daha düşük RMSE hem de daha yüksek R^2 değerlerine sahiptir. Bu da modelin hata oranlarının daha düşük ve veri varyansını daha iyi açıkladığı anlamına gelmekte olup, üstün performansını doğrulamaktadır. Ayrıca, bu çalışmanın temelini oluşturan GPR modelinin, literatürde farklı gıda ürünlerine yönelik uygulamalarda da benzer şekilde düşük RMSE ve yüksek R^2 değerleriyle etkili tahmin sonuçları verdiği rapor edilmiştir [80-82]. Bu bulgular, GPR modelinin gıdayla ilişkili regresyon temelli modelleme çalışmalarında güvenilir ve güçlü bir yöntem olduğunu desteklemektedir.

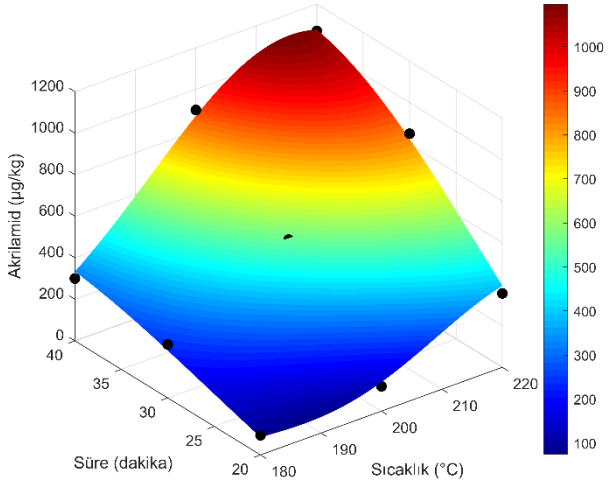
Tablo 3. Modellerin elde ettikleri RMSE ve R^2 değerleri

Model	RMSE	R^2
PSA-GPR	56.9030	0.9748
Doğrusal	130.7603	0.8669
Etkileşimli	98.0406	0.9252
Basit karesel	125.9778	0.8765
Karesel	91.5649	0.9348
Gauss	81.7628	0.9480
Logaritmik	149.9761	0.8250
Üstel	126.4188	0.8756

Karşılaştırmalı sonuçlar doğrultusunda, en yüksek doğruluğu sağlayan PSA-GPR modeline ait sıcaklık ve süre değişimlerine karşılık akrilamid oluşumunun yanıt yüzeyi Şekil 3'te sunulmuştur. Bu üç boyutlu yüzey grafiği, pişirme süresi (dakika) ve sıcaklık (°C) değişimlerine karşılık akrilamid oluşumunu (µg/kg) göstermektedir. Grafik üzerinde ayrıca, ölçülen akrilamid seviyeleri siyah işaretleyiciler ile belirtilmiş ve modelin gözlemlerle uyumu görsel olarak da değerlendirilmiştir. Grafik incelendiğinde, sıcaklık ve sürenin artışıyla birlikte akrilamid seviyelerinde belirgin bir artış meydana geldiği gözlemlenmektedir. Özellikle yüksek sıcaklık ve uzun pişirme süresi kombinasyonlarında akrilamid konsantrasyonlarının yüksek seviyelere ulaştığı; buna karşılık, düşük sıcaklık ve kısa pişirme süresi koşullarında ise akrilamid oluşumunun düşük seviyelerde kaldığı görülmektedir.

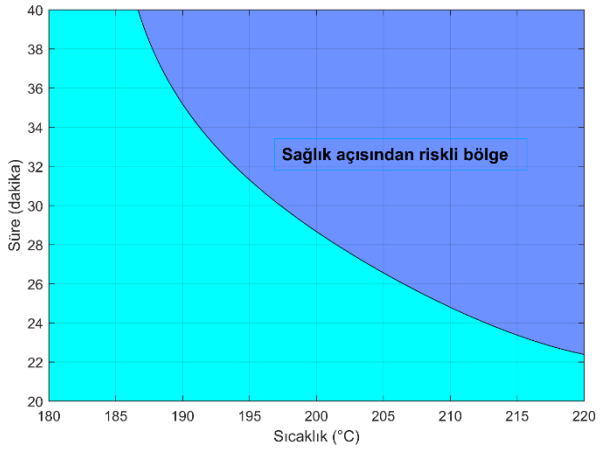


Şekil 2. Modellerin tahmin ettiği akrilamid değerleri ile deneysel olarak ölçülen akrilamid değerleri arasındaki uyumun karşılaştırması



Şekil 3. PSA-GPR modeline ait sıcaklık ve süre değişimlerine karşılık akrilamid oluşumunun yanıt yüzey grafiği

Avrupa Birliği'nin EU 2017/2158 sayılı regülasyonu kapsamında, patates kızartmaları için 500 µg/kg düzeyinde bir referans seviye tanımlanmıştır [83]. Bu referans değeri temel alarak, akrilamid oluşumuna bağlı potansiyel sağlık risklerini değerlendirmek amacıyla, pişirme sıcaklığı ve süresi değişimlerine göre oluşturulan sağlık riski haritası Şekil 4'te sunulmuştur. Bu haritada, açık mavi renkle gösterilen alan, akrilamid seviyelerinin referans değerin (500 µg/kg) altında kaldığı ve sağlık açısından düşük risk taşıyan pişirme koşullarını ifade etmektedir. Buna karşılık, koyu mavi (lacivert) renkle gösterilen bölge, akrilamid seviyelerinin referans değeri aştığı ve potansiyel sağlık riski oluşturduğu pişirme koşullarını göstermektedir. Grafik incelendiğinde, yüksek sıcaklık ve uzun pişirme süresi kombinasyonlarının riskli bölgeyle ilişkili olduğu; düşük sıcaklık ve kısa pişirme süresi koşullarında ise akrilamid oluşumunun sağlık açısından kabul edilebilir seviyelerde kaldığı belirlenmiştir. Bu harita, güvenli pişirme koşullarının tanımlanmasına, akrilamid maruziyetinin azaltılmasına ve halk sağlığının korunmasına yönelik önemli bilimsel bilgiler sunmaktadır.



Şekil 4. Pişirme sıcaklığı ve süresine göre akrilamid oluşumuna dayalı sağlık riski haritası

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, ev tipi fırında pişirilen patates kızartmalarında pişirme sıcaklığı ve süresinin akrilamid oluşumu üzerindeki etkileri incelenmiş ve elde edilen veriler GPR modeli kullanılarak modellenmiştir. Modelin hiperparametreleri, yeni bir meta-sezgisel optimizasyon yöntemi olan PSA aracılığıyla optimize edilmiştir. Optimizasyon sürecinde, modelin aşırı öğrenmesini önlemek ve tahmin performansını artırmak amacıyla LOOCV stratejisi uygulanmıştır. Önerilen PSA-GPR modeli, diğer çok değişkenli regresyon modellerine kıyasla ölçülen akrilamid seviyelerini daha yüksek doğrulukla temsil etmiştir. Bulgular, pişirme sıcaklığı ve süresinin artışıyla akrilamid seviyelerinde anlamlı yükselmeler meydana geldiğini açıkça ortaya koymuştur. Avrupa Birliği tarafından belirlenen referans değerler esas alınarak gerçekleştirilen risk haritalandırması ise, sağlık açısından kritik eşiklerin aşıldığı pişirme koşullarını belirlemede önemli bir araç sunmuştur.

Bu çalışma, ilerleyen araştırma ve geliştirme faaliyetleri için çeşitli olanaklar sunmaktadır. Aşağıda, gelecekteki çalışmalara yönelik potansiyel araştırma yönleri önerilmektedir:

- Bütçe kısıtlamaları nedeniyle sınırlı sayıda deney gerçekleştirilebilmiş olsa da daha geniş bir deneysel tasarımın ve deney tekrarlarının uygulanması, modelin geçerliliğini ve elde edilen sonuçların güvenilirliğini artırabilir. Ayrıca, bağımsız test veri setleri üzerinde doğrulama süreçlerinin gerçekleştirilmesi, modelin tahmin performansının daha kapsamlı bir biçimde değerlendirilmesine katkı sağlayabilir.
- Veri setinin genişletilmesi, yapay sinir ağları, destek vektör regresyonu, karar ağaçları ve XGBoost gibi farklı makine öğrenmesi yöntemlerinin uygulanmasına olanak sağlayabilir. Bu sayede, farklı algoritmaların modelleme performansları karşılaştırılabilir ve en uygun yöntem seçilerek daha yüksek tahmin doğruluğu elde edilebilir.
- Çalışma kapsamında önerilen PSA-GPR modeli, yalnızca akrilamid oluşumunun modellenmesiyle sınırlı kalmayıp, özellikle örneklem sayısı düşük olan deneysel veri setlerinde de esnek biçimde uygulanabilir. Bu yönüyle modelin farklı alanlardaki veri yapıları üzerinde etkili biçimde kullanılması mümkündür.
- Akrilamid oluşumuna etki eden diğer faktörler dikkate alınarak, akrilamid miktarına ek olarak ürün kalitesiyle ilişkili renk, doku ve duyusal özellikler gibi farklı çıkış değişkenleri PSA-GPR modeli kullanılarak modellenebilir. Bunu takiben, çok amaçlı bir optimizasyon problemi tanımlanarak, PSA algoritması aracılığıyla birden fazla çıkış değişkeni için optimum pişirme koşulları belirlenebilir.

Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 2209-B Üniversite Öğrencileri Sanayiye Yönelik Araştırma Projeleri Desteği Programı kapsamında desteklenmiştir. Bu destek için TÜBİTAK'a ve sanayi destekçisi olarak katkılarından

dolayı BSH Ev Aletleri Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye teşekkür ederiz. Ayrıca, çalışma sürecinde sağladığı değerli bilgi ve katkılarından dolayı Prof. Dr. Ahmet KOLUMAN'a teşekkür ederiz.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %11

Kaynaklar

[1] V. Gökmen, T. K. Palazoğlu, and H. Z. Şenyuva, Relation between the acrylamide formation and time–temperature history of surface and core regions of French fries. Journal of Food Engineering, 77 (4), 972-976, 2006. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.08.030.

[2] G. Arusoğlu, Akrilamid oluşumu ve insan sağlığına etkileri. Akademik Gıda, 13 (1), 61-71, 2015.

[3] H. A. Deribew and A. Z. Woldegiorgis, Acrylamide levels in coffee powder, potato chips and French fries in Addis Ababa city of Ethiopia. Food Control, 123, 107727, 2021. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107727.

[4] L. Peivasteh-Roudsari, M. Karami, R. Barzegar-Bafrouei, S. Samiee, H. Karami, B. Tajdar-Oranj, V. Mahdavi, A. M. Alizadeh, P. Sadighara, G. O. Conti, and A. Mousavi Khaneghah, Toxicity, metabolism, and mitigation strategies of acrylamide: a comprehensive review. International Journal of Environmental Health Research, 34 (1), 1–29, 2022. https://doi.org/10.1080/09603123.2022.2123907.

[5] T. K. Tepe, Patates kızartmada uygulanan farklı işlemlerin akrilamid oluşumu üzerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2018.

[6] N. M. Nizamlıoğlu ve S. Nas, Gıdalarda Akrilamid Oluşum Mekanizmaları, Gıdaların Akrilamid İçeriği Ve Sağlık Üzerine Etkileri. Akademik Gıda, 17 (2), 232-242, 2019. https://doi.org/10.24323/akademik-gida.613588.

[7] N. M. Nizamlıoğlu, Kavurma ve depolama koşullarının Bademin bazı fiziksel, kimyasal ve duyusal özellikleri üzerine etkisi. Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2015.

[8] A. Karagöz, Akrilamid ve Gıdalarda Bulunuşu. TAF Preventive Medicine Bulletin, 8 (2), 187-192, 2009.

[9] M. Gölükçü and H. Tokgöz, Gıdalarda akrilamid oluşum mekanizması ve insan sağlığı üzerine etkileri. Derim, 22 (1), 41-48, 2005.

[10] F. Ş. Bayraktar, Isıl ışlemin yağ oranı kısmen azaltılmış fındık üzerine etkisinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2014.

[11] International Agency for Research on Cancer (IARC), Some industrial chemicals. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Vol. 60, 1994, https://publications.iarc.fr/78, Accessed 29 April 2025.

[12] European Commission, Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council Amending Directive 2004/37/EC on the Protection of Workers From the Risks Related to Exposure to Carcinogens or Mutagens at Work. Brussels, 2016.

[13] V. Matoso, P. Bargi-Souza, F. Ivanski, M. A. Romano, and R. M. Romano, Acrylamide: A review about its toxic effects in the light of Developmental Origin of Health and Disease (DOHaD) concept. Food Chemistry, 283, 422-430, 2019. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.054.

[14] M. Bušová, V. Bencko, K. V. Laktičová, I. Holcátová, and M. Vargová, Risk of exposure to acrylamide. Central European Journal of Public Health, 28, 43-46, 2020. https://doi.org/10.21101/cejph.a6177.

[15] M. Fan, X. Xu, W. Lang, W. Wang, X. Wang, A. Xin, F. Zhou, Z. Ding, X. Ye, and B. Zhu, Toxicity, formation, contamination, determination and mitigation of acrylamide in thermally processed plant-based foods and herbal medicines: A review. Ecotoxicology and Environmental Safety, 260, 115059, 2023. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115059.

[16] V. Gokmen and B. A. Mogol, Acrylamide in food. Elsevier, 2023.

[17] B. Asar, Ev Tipi Fırında Sıcak Hava İle Kızartma İşleminin, Taze Ve Dondurulmuş Parmak Patateslerin Kalite Parametrelerine Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2014.

[18] F. Pedreschi, K. Kaack, K. Granby, and E. Troncoso, Acrylamide reduction under different pre-treatments in French fries. Journal of Food Engineering, 79 (4), 1287-1294, 2007. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.04.014.

[19] F. Mestdagh, T. De Wilde, S. Fraselle, Y. Govaert, W. Ooghe, J. M. Degroodt, R. Verhé, C. V. Peteghem, and B. De Meulenaer, Optimization of the blanching process to reduce acrylamide in fried potatoes. LWT-Food Science and Technology, 41 (9), 1648-1654, 2008. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.10.007.

[20] D. K. Bedade, Y. B. Sutar, and R. S. Singhal, Chitosan coated calcium alginate beads for covalent immobilization of acrylamidase: Process parameters and removal of acrylamide from coffee. Food Chemistry, 275, 95-104, 2009. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.090.

[21] S. Wang, J. Yu, Q. Xin, S. Wang, and L. Copeland, Effects of starch damage and yeast fermentation on acrylamide formation in bread. Food Control, 73, 230-236, 2017. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.08.002.

[22] A. Antunes-Rohling, S. Ciudad-Hidalgo, J. Mir-Bel, J. Raso, G. Cebrián, and I. Álvarez, Ultrasound as a pretreatment to reduce acrylamide formation in fried potatoes. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 49, 158-169, 2018. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.08.010.

[23] J. Genovese, S. Tappi, W. Luo, U. Tylewicz, S. Marzocchi, S. Marziali, S. Romani, L. Ragni, and P. Rocculi, Important factors to consider for acrylamide mitigation in potato crisps using pulsed electric fields. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 55, 18-26, 2019. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.05.008.

[24] Y. Narita and K. Inouye, Decrease in the acrylamide content in canned coffee by heat treatment with the addition of cysteine. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 62 (50), 12218-12222, 2014. https://doi.org/10.1021/jf5035288.

[25] M. Z. Mulla, V. R. Bharadwaj, U. S. Annapure, P. S. Variyar, A. Sharma, and R. S. Singhal, Acrylamide content in fried chips prepared from irradiated and non-irradiated stored potatoes. Food Chemistry, 127 (4), 1668-1672, 2011. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.02.034.

[26] A. A. Maan, M. A. Anjum, M. K. I. Khan, A. Nazir, F. Saeed, M. Afzaal, and R. M. Aadil, Acrylamide Formation and Different Mitigation Strategies during Food Processing – A Review. Food Reviews International, 38 (1), 70-87, 2022. https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1719505.

[27] X. Zhang, M. Zhang, and B. Adhikari, Recent developments in frying technologies applied to fresh foods. Trends in Food Science & Technology, 98, 68-81, 2020. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.007.

[28] C. Rannou, D. Laroque, E. Renault, C. Prost, and T. Sérot, Mitigation strategies of acrylamide, furans, heterocyclic amines and browning during the Maillard reaction in foods. Food Research International, 90, 154-176, 2016. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.10.037.

[29] R. Pandiselvam, Ö. Süfer, Z. T. Özaslan, N. A. N. Gowda, M. K. Pulivarthi, A. P. R. Charles, B. Ramesh, S. Ramniwas, S. Rustagi, Z. Jafari, and G. Jeevarathinam, Acrylamide in food products: Formation, technological strategies for mitigation, and future outlook. Food Frontiers, 5 (3), 1063-1095, 2024. https://doi.org/10.1002/fft2.368.

[30] L. Rifai and F. A. Saleh, A review on acrylamide in food: Occurrence, toxicity, and mitigation strategies. International Journal of Toxicology, 39 (2), 93-102, 2020. https://doi.org/10.1177/1091581820902.

[31] M. A. Adimas, B. D. Abera, Z. T. Adimas, H. W. Woldemariam, and M. A. Delele, Traditional food processing and Acrylamide formation: A review. Heliyon, 10 (9), e30258, 2024. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30258.

[32] I. Govindaraju, M. Sana, I. Chakraborty, M. H. Rahman, R. Biswas, and N. Mazumder, Dietary Acrylamide: A Detailed Review on Formation, Detection, Mitigation, and Its Health Impacts. Foods, 13 (4), 556, 2024. https://doi.org/10.3390/foods13040556.

[33] V. Gökmen and H. Z. Şenyuva, Acrylamide formation is prevented by divalent cations during the Maillard reaction. Food Chemistry, 103 (1), 196-203, 2007. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.08.011.

[34] G. Mutlu, S. Uğur ve B. Şimşek, Farklı tatlandırıcılar ve kaymak kullanımı ile üretilen Höşmerim tatlısının akrilamid içeriği ve bazı özellikleri. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 14 (2), 588-596, 2025. https://doi.org/10.28948/ngumuh.1587053.

[35] B. Matthäus, N. U. Haase, and K. Vosmann, Factors affecting the concentration of acrylamide during deep-fat frying of potatoes. European Journal of Lipid Science and Technology, 106 (11), 793-801, 2004. https://doi.org/10.1002/ejlt.200400992.

[36] F. Pedreschi, P. Moyano, K. Kaack, and K. Granby, Color changes and acrylamide formation in fried potato slices. Food Research International, 38 (1), 1-9, 2005. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2004.07.002.

[37] D. M. H. Farah and A. H. Zaibunnisa, Optimization of cocoa beans roasting process using Response Surface Methodology based on concentration of pyrazine and acrylamide. International Food Research Journal, 19 (4), 2012.

[38] O. Lasekan and K. Abbas, Investigation of the roasting conditions with minimal acrylamide generation in tropical almond (Terminalia catappa) nuts by response surface methodology. Food Chemistry, 125 (2), 713-718, 2011. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.09.073.

[39] E. Akwagiobe, M. Ekpenyong, A. Asitok, A. Amenaghawon, D. Ubi, E. Ikharia, H. Kusuma, and S. Antai, Strain improvement, artificial intelligence optimization, and sensitivity analysis of asparaginase-mediated acrylamide reduction in sweet potato chips. Journal of Food Science and Technology, 60 (9), 2358-2369, 2023. https://doi.org/10.1007/s13197-023-05757-5.

[40] H. Liu, X. Li, and Y. Yuan, Mitigation effect of sodium alginate on acrylamide formation in fried potato chips system based on response surface methodology. Journal of Food Science, 85 (8), 2615-2621, 2020. https://doi.org/10.1111/1750-3841.15343.

[41] M. J. Chen, H. T. Hsu, C. L. Lin, and W. Y. Ju, A statistical regression model for the estimation of acrylamide concentrations in French fries for excess lifetime cancer risk assessment. Food and Chemical Toxicology, 50 (10), 3867-3876, 2012. https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.07.010.

[42] Y. Zhang and Y. Wu, Introducing Machine Learning Models to Response Surface Methodologies. IntechOpen, 2021.

[43] E. Alpaydin, Introduction to machine learning. MIT press, 2020.

[44] X. Liu, G. Sun, R. Ju, J. Li, Z. Li, Y. Jiang, K. Zhao, Y. Zhang, Y. Jing, and G. Yang, Prediction of load-bearing capacity of FRP-steel composite tubed concrete columns: Using explainable machine learning model with limited data. Structures, 71,

10789, 2025. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107890.

[45] Q. Chen and C. Yang, Hybrid algorithm for multi-objective optimization design of parallel manipulators. Applied Mathematical Modelling, 98, 245-265, 2021. https://doi.org/10.1016/j.apm.2021.05.009.

[46] F. Zhu, C. Xu, and G. Dui, Particle swarm hybridize with Gaussian process regression for displacement prediction. 2010 IEEE Fifth International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications (BIC-TA), 522-525, Changsha, China, 2010. https://doi.org/10.1109/BICTA.2010.5645179.

[47] B. K. Isamura and P. L. Popelier, Metaheuristic optimisation of Gaussian process regression model hyperparameters: Insights from FEREBUS. Artificial Intelligence Chemistry, 1 (2), 100021, 2023. https://doi.org/10.1016/j.aichem.2023.100021.

[48] L. Kang, R. S. Chen, N. Xiong, Y. C. Chen, Y. X. Hu and C. M. Chen, Selecting hyper-parameters of Gaussian process regression based on non-inertial particle swarm optimization in Internet of Things. IEEE Access, 7, 59504-59513, 2019. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2913757.

[49] J. A. Rufián-Henares and F. J. Morales, Determination of acrylamide in potato chips by a reversed-phase LC–MS method based on a stable isotope dilution assay. Food Chemistry, 97 (3), 555-562, 2006. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.06.007.

[50] J. Q. Shi and T. Choi, Gaussian process regression analysis for functional data. CRC press, 2011.

[51] T. Hai, A. Basem, A. A. Alizadeh, K. Sharma, D. J. Jasim, H. Rajab, M. Ahmed, M. Kassim, N. S. S. Singh, and H. Maleki, Optimizing Gaussian process regression (GPR) hyperparameters with three metaheuristic algorithms for viscosity prediction of suspensions containing microencapsulated PCMs. Scientific Reports, 14 (1), 20271, 2024. https://doi.org/10.1038/s41598-024-71027-9.

[52] F. Gisperg, R. Klausser, M. Elshazly, J. Kopp, E. P. Brichtová, and O. Spadiut, Bayesian Optimization in Bioprocess Engineering—Where Do We Stand Today?. Biotechnology and Bioengineering, 2025. https://doi.org/10.1002/bit.28960.

[53] M. A. Ulaş, Gauss Süreç Regresyonu ve Destek Vektör Makineleri Kullanılarak Değerlendirilen Kendiliğinden Yerleşen Beton Davranışının Deneysel Veri İle Doğrulanması. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 35 (1), 379-388, 2023. https://doi.org/10.35234/fumbd.1237839.

[54] M. Ehteram, A. N. Ahmed, Z. Sheikh Khozani, and A. El-Shafie, Convolutional neural network-support vector machine model-gaussian process regression: a new machine model for predicting monthly and daily rainfall. Water Resources Management, 37 (9), 3631-3655, 2023. https://doi.org/10.1007/s11269-023-03519-8.

[55] J. Yuan, K. Wang, T. Yu, and M. Fang, Reliable multi-objective optimization of high-speed WEDM process based on Gaussian process regression. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 48 (1), 47-60, 2008. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.07.011.

[56] B. Likar and J. Kocijan, Predictive control of a gas–liquid separation plant based on a Gaussian process model. Computers & Chemical Engineering, 31 (3), 142-152, 2007. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2006.05.011.

[57] L. L. T. Chan, Y. Liu, and J. Chen, Nonlinear System Identification with Selective Recursive Gaussian Process Models. Industrial & Engineering Chemistry Research, 52 (51), 18276-18286, 2013. https://doi.org/10.1021/ie4031538.

[58] T. Gil-Díaz and M. Trumm, Gaussian process regression as a powerful tool for analysing time series in environmental geochemistry. Ecological Informatics, 84, 102877, 2024. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102877.

[59] O. Ozbayram, A. Olivier, and L. Graham-Brady, Heteroscedastic Gaussian Process Regression for material structure–property relationship modeling. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 431, 117326, 2024. https://doi.org/10.1016/j.cma.2024.117326.

[60] N. Gültekin ve A. Doğan, Kohezyonlu zeminlerde net limit basınç ve deformasyon modülünün makine öğrenimi temelli modeller kullanılarak tahmin edilmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11 (4), 1025-1033, 2022. https://doi.org/10.28948/ngumuh.1155568.

[61] C. E. Rasmussen, Gaussian Processes in Machine Learning. Advanced Lectures on Machine Learning, ML 2003, Lecture Notes in Computer Science, 3176. Springer, Berlin, Heidelberg, 2003. https://doi.org/10.1007/978-3-540-28650-9_4.

[62] A. Kumar, S. Patil, A. Kovacevic, and S. A. Ponnusami, Performance prediction and Bayesian optimization of screw compressors using Gaussian Process Regression. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 133, 108270, 2024. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108270.

[63] Y. Gao, PID-based search algorithm: A novel metaheuristic algorithm based on PID algorithm. Expert Systems with Applications, 232, 120886, 2023. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120886.

[64] M. A. Azad, A. Sarwar, M. Tariq, F. I. Bakhsh, S. Ahmad, A. S. N. Mohamed, and M. R. Islam, Global maximum power point tracking for photovoltaic systems under partial and complex shading conditions using a PID based search algorithm (PSA). IET Renewable Power Generation, 19 (1), e70005, 2025. https://doi.org/10.1049/rpg2.70005.

[65] W. Jiang, H. Han, D. Feng, L. Qian, Q. Wang, and X. G. Xia, Energy-efficient and Accuracy-aware DNN Inference with IoT Device-edge Collaboration. IEEE Transactions on Services Computing, 1–14, 2025. https://doi.org/10.1109/TSC.2025.3536311.

[66] Z. You, Y. Bian, Y. Zhang, and L. Chen, An intelligent optimization algorithm with novel fitness function for high-performance PMSM FOC. Alexandria Engineering Journal, 115, 286–296, 2025. https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.12.029.

[67] F. Li, D. Wang, N. Zhang, R. Zheng and Y. Zhu, Autocalibration for MEMS triaxial accelerometer based on a PID-based search algorithm. 2024 6th International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing (ICMSP), pp. 470-473, Xi'an, China, 2024. https://doi.org/10.1109/ICMSP64464.2024.10866298.

[68] E. Bouguenna, B. Lekouaghet, and M. Haddad, Improved Fractional $PI^{\alpha}D^{\beta}$ Controller for AVR System via a New Optimization Algorithm. 2nd International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control (ICEEAC), 1-6, Algeria, 2024. https://doi.org/10.1109/ICEEAC61226.2024.10576215.

[69] S. Tang, Z. Chai, X. Wang, H. Chang, and X. Guo, Adaptive impedance control method for manipulator based on radial basis function. Industrial Robot, 2024. https://doi.org/10.1108/IR-07-2024-0327.

[70] B. Ghojogh and M. Crowley, The Theory Behind Overfitting, Cross Validation, Regularization, Bagging, and Boosting: Tutorial. arXiv preprint arXiv:1905.12787, 2019. https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.12787.

[71] Y. A. Üncü, T. Danışman, and H. Özdoğan, Predicting (n, 3n) nuclear reaction cross-sections using XGBoost and Leave-One-Out Cross-Validation. Applied Radiation and Isotopes, 219, 111714, 2025. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2025.111714.

[72] T. K. Tepe and Ç. Kadakal, Temperature and slice size dependences of acrylamide in potato fries. Journal of Food Processing and Preservation, 43 (12), e14270, 2019. https://doi.org/10.1111/jfpp.14270.

[73] J. Michalak, E. Gujska, and J. Klepacka, The Effect of Domestic Preparation of Some Potato Products on Acrylamide Content. Plant Foods for Human Nutrition, 66, 307-312, 2011. https://doi.org/10.1007/s11130-011-0252-2.

[74] R. Lu, Z. Yang, H. Song, Y. Zhang, S. Zheng, Y. Chen, and N. Zhou, The aroma-active compound, acrylamide and ascorbic acid contents of pan-fried potato slices cooked by different temperature and time. Journal of Food Processing and Preservation, 40 (2), 183-191, 2016. https://doi.org/10.1111/jfpp.12595.

[75] L. El Hosry, V. Elias, V. Chamoun, M. Halawi, P. Cayot, A. Nehme, and E. Bou-Maroun, Maillard Reaction: Mechanism, Influencing Parameters, Advantages, Disadvantages, and Food Industrial Applications: A Review. Foods, 14 (11), 1881, 2025. https://doi.org/10.3390/foods14111881.

[76] A. Serpen and V. Gökmen, Modeling of acrylamide formation and browning ratio in potato chips by artificial neural network. Molecular Nutrition & Food Research, 51 (4), 383-389, 2007. https://doi.org/10.1002/mnfr.200600121.

[77] S. Romani, M. Bacchiocca, P. Rocculi, and M. Dalla Rosa, Effect of frying time on acrylamide content and quality aspects of French fries. European Food Research and Technology, 226, 555-560, 2008. https://doi.org/10.1007/s00217-007-0570-7.

[78] M. G. Corradini and M. Peleg, Linear and non-linear kinetics in the synthesis and degradation of acrylamide in foods and model systems. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 46 (6), 489-517, 2006. https://doi.org/10.1080/10408390600758280.

[79] D. Chicco, M. J. Warrens, and G. Jurman, The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. PeerJ Computer Science, 7, e623, 2021. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623.

[80] P. Chaurasia, K. Younis, O. S. Qadri, G. Srivastava, and K. Osama, Comparison of Gaussian process regression, artificial neural network, and response surface methodology modeling approaches for predicting drying time of mosambi (Citrus limetta) peel. Journal of Food Process Engineering, 42 (2), e12966, 2019. https://doi.org/10.1111/jfpe.12966.

[81] X. Chen, J. Xue, X. Chen, X. Zhao, S. Ali, and G. Huang, Gaussian process regression for prediction and confidence analysis of fruit traits by near-infrared spectroscopy. Food Quality and Safety, 7, fyac068, 2023. https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyac068.

[82] R. R. Pullanagari and M. Li, Uncertainty assessment for firmness and total soluble solids of sweet cherries using hyperspectral imaging and multivariate statistics. Journal of Food Engineering, 289, 110177, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110177.

[83] European Commission, Commission Regulation (EU) 2017/2158 establishing mitigation measures and benchmark levels for the reduction of the presence of acrylamide in food. Official Journal of the European Union, L304, 24–44, 2017, http://data.europa.eu/eli/reg/2017/2158/oj, Accessed 08 May 2025.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 1100-1115

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

PushPull-YOLO: A biologically inspired framework for robust object detection under image corruptions

PushPull-YOLO: Görüntü bozulmaları altında güçlü nesne algılama için biyoloji esinli bir çerçeve

Hasan Ali Akyürek[1,*]

[1] *Department of Biostatistics and Medical Informatics, Faculty of Medicine, Necmettin Erbakan University, Konya, Türkiye*

Abstract

In this study, a novel integration of PushPull-Convolutional Layers into the YOLOv11 object detection model is proposed to enhance robustness against diverse image corruptions. The PushPull-Conv layer is designed based on biological mechanisms of the primary visual cortex, where complementary push and pull kernels are utilized to improve selectivity by amplifying relevant stimuli and suppressing irrelevant noise. The initial convolutional layer of YOLOv11 is replaced by this modification, and performance is evaluated on the COCO dataset across 15 corruption types (e.g., noise, blur, weather, digital artifacts) with five severity levels. Improved robustness metrics are achieved by the PushPull-enhanced YOLOv11 compared to the baseline. Detection performance under challenging conditions, including brightness variation, motion blur, and contrast changes, is enhanced. A link is established between biologically inspired design and deep learning, positioning PushPull-YOLO as a promising solution for real-time object detection in dynamic environments, with potential extensions to segmentation and keypoint detection.

Keywords: Convolutional layers, Deep learning, Image corruption, Object detection, PushPull, YOLO

Öz

Bu çalışmada, YOLOv11 nesne tespit modeline PushPull Konvolüsyon Katmanlarının özgün bir entegrasyonu önerilerek görüntü bozulmalarına karşı dayanıklılığın artırılması amaçlanmıştır. PushPull-Conv katmanı, birincil görsel korteksin biyolojik mekanizmalarından esinlenerek tasarlanmış ve tamamlayıcı push ve pull çekirdekleri kullanılarak ilgili uyaranların güçlendirilmesi ve ilgisiz gürültünün bastırılması yoluyla seçiciliğin artırılması sağlanmıştır. YOLOv11'in ilk konvolüsyon katmanı bu değişiklik ile değiştirilmiş ve performans, COCO veri kümesi üzerinde 15 farklı bozulma türü (ör. gürültü, bulanıklık, hava koşulları ve dijital bozulmalar) ve beş şiddet düzeyinde değerlendirilmiştir. PushPull ile güçlendirilmiş YOLOv11'in, temel modele kıyasla üstün dayanıklılık metrikleri elde ettiği gösterilmiştir. Parlaklık değişimi, hareket bulanıklığı ve kontrast farklılıkları gibi zorlu koşullar altında tespit performansı iyileştirilmiştir. Biyolojik esinli tasarım ile derin öğrenme arasında bir bağlantı kurulmuş ve PushPull-YOLO'nun dinamik ortamlarda gerçek zamanlı nesne tespiti için umut verici bir çözüm sunduğu ortaya konulmuştur. Ayrıca yöntemin gelecekte segmentasyon ve anahtar nokta tespiti gibi diğer bilgisayarla görme görevlerine de uygulanabileceği düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Evrişimsel katmanlar, Derin öğrenme, Görüntü bozulması, Nesne algılama, PushPull, YOLO

1 Introduction

Object detection stands as a pivotal domain within modern computer vision, underpinning a diverse range of applications such as autonomous vehicles [1], surveillance systems [2], healthcare diagnostics [3, 4], and industrial automation [5]. Among the numerous inventions in this field, the YOLO series has proved to be the cornerstone innovation for object detection [6]. In fact, YOLO redefined object detection as a single-shot regression problem, which gave it unrivaled real-time performance [6, 7]. From 2015 onwards, the series has undergone continuous refinement and now includes an improved version called YOLOv11, with state-of-the-art improvements in precision and efficiency [8].

However, despite these advancements, object detection in real-world scenarios remains fraught with challenges [9]. Image corruptions, arising from noise, blurring effects, weather-induced distortions, or digital artifacts, significantly degrade model performance [10]. Addressing these adversities requires architectural innovations that bolster robustness while ensuring computational efficiency. This study integrates the PushPull convolutional methodology into YOLOv11, presenting a novel approach inspired by the selective inhibition mechanisms observed in the primary visual cortex. These PushPull-Conv units emulate the neural process of emphasizing relevant stimuli while suppressing non-preferred features, thus enhancing the model's resilience against diverse corruption types [11].

Such robust systems are essentially needed since the deployment of object detection models has been increasing in high-stake environments. For instance, autonomous

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: hakyurek@erbakan.edu.tr (H. A. Akyürek)
Geliş / Received: 21.03.2025 Kabul / Accepted: 24.06.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1662465

driving operates under dynamic conditions, where different light and weather conditions create different artifacts. Similarly, medical imaging should also perform well which might contain different visual or processing artifacts [1, 9, 10]. This study tries to bridge these gaps by introducing PushPull convolution into YOLOv11 and hence creates a system which is not only state-of-the-art on benchmark datasets but also highly robust against real-world perturbations [11].

This study provides a systematic investigation of the integration of PushPull and its implications on robustness metrics and general performance. Training and analysis will be done on COCO using different corruption types, from simple Gaussian noise to complex ones like JPEG compression artifacts [12]. The biologically inspired origin of the methodology will ensure enhancements that are effective yet computationally efficient, maintaining the real-time performance hallmark of YOLOv11. Insights from this research go on to underline the potential in marrying biologically inspired principles with advanced deep learning architectures toward the creation of future innovations in robust computer vision systems [13-15].

The integration of biologically inspired methodologies, like PushPull convolutions, in state-of-the-art deep learning models like YOLOv11 signifies a movement toward hybrid architectures, which will offer computational efficiency together with adaptability [16]. The PushPull mechanism, which was originally developed to enhance the robustness in convolutional networks, suppresses the effects of high-frequency and structural image corruptions through selective inhibition. This is related to principles in the mammalian visual cortex, where inhibitory mechanisms sharpen perceptual selectivity and reduce noise interference [11].

The PushPull mechanism is inspired by the selective inhibition properties observed in the primary visual cortex, where excitatory and inhibitory receptive fields jointly enhance edge detection and noise suppression. In biological vision systems, neurons in the early stages of the visual hierarchy—particularly in the V1 area—are organized to respond to specific spatial and orientation patterns through a balance of excitatory and suppressive inputs. This organization allows the system to amplify salient features, such as edges and contours, while simultaneously attenuating irrelevant background noise and artifacts. The push (excitatory) and pull (inhibitory) interactions observed in these receptive fields serve as a biologically efficient filtering strategy, enabling robust perception even under visually challenging conditions. Emulating this principle in artificial networks, PushPull convolutions seek to replicate the dual response mechanism, promoting enhanced feature selectivity and greater robustness to image corruptions such as blur, noise, and occlusion [17-20].

Real-world applications, ranging from critical medical imaging diagnostics to autonomous navigation, demand such robustness [3, 21]. These systems often encounter unpredictable image distortions, ranging from environmental factors like low-light conditions and atmospheric disturbances to synthetic alterations such as lossy compression artifacts. Traditional object detection architectures, even with advanced data augmentation techniques, struggle to sustain high performance under these challenges [22-24]. By embedding PushPull convolutions at strategic points within the YOLOv11 pipeline, this research addresses these gaps, potentially elevating both detection accuracy and model stability [11].

YOLOv11, the latest version in the YOLO family, integrates several novel components such as the C3k2 block, the spatial attention-based C2PSA module, and an improved neck-head pipeline, making it particularly efficient and accurate for real-time object detection [8, 25]. To the best of our knowledge, this study represents the first integration of biologically inspired PushPull convolutional units into the YOLOv11 architecture to enhance robustness against corrupted visual input.

Moreover, this study offers a comparative evaluation between the standard YOLOv11 architecture and its enhanced variant employing PushPull layers. This involves a meticulous analysis of performance metrics on corruption-focused datasets such as COCO-C [10], examining both accuracy and robustness across diverse scenarios. The results aim to provide actionable insights into the practicality of incorporating biologically inspired mechanisms into cutting-edge computer vision frameworks.

2 Related work

The YOLO series has consistently improved object detection capabilities through architectural enhancements. YOLOv11 introduces key features such as the C3k2 block, Spatial Pyramid Pooling-Fast (SPPF), and Cross-Stage Partial with Spatial Attention (C2PSA), delivering significant gains in accuracy and computational efficiency [6, 26]. Additionally, architectural improvements, such as the incorporation of the C3k2 block and the C2PSA attention module, further enhance the model's ability to process spatial information and focus on critical regions within images. These modules play a pivotal role in ensuring efficient and accurate object detection across various visual scenarios [27]. The architecture of YOLOv11 is shown in Figure 1.

PushPull convolution is inspired by the antiphase inhibition phenomenon in the primary visual cortex, PushPull convolution utilizes complementary push and pull kernels. These kernels enhance stimulus selectivity by amplifying preferred features while inhibiting non-preferred ones. Previous studies have demonstrated its effectiveness in ResNet architectures, particularly for tasks requiring robustness to image corruptions [11]. Robustness to image corruptions is a critical challenge in computer vision. Techniques such as data augmentation and adversarial training have shown promise, but architectural modifications, such as PushPull-Conv, provide a complementary approach by inherently improving model resilience [11, 28].

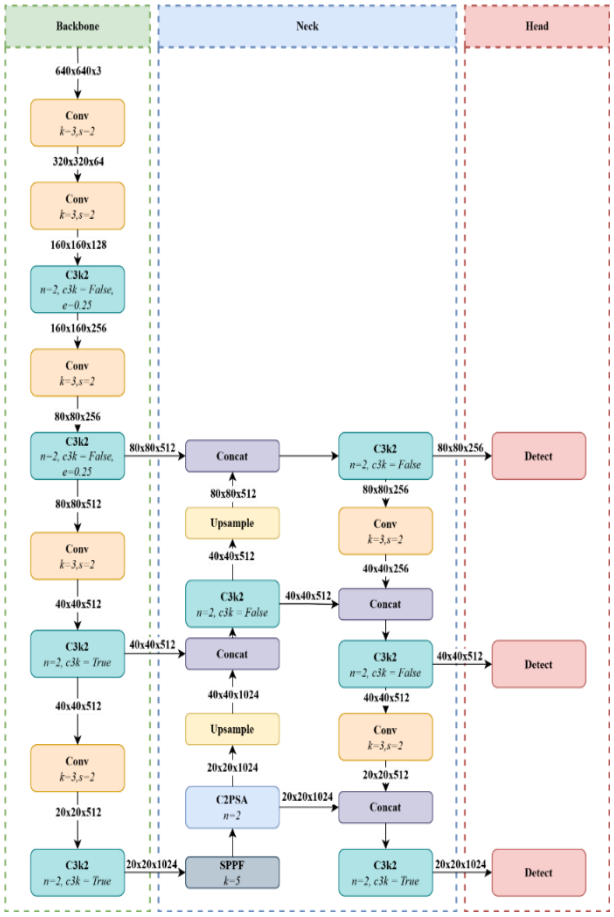


Figure 1. Architecture of YOLOv11

3 Materials and methods

3.1 Architectural modifications

The integration of PushPull convolution into YOLOv11 involves replacing the first convolutional layer with a specialized PushPull-Conv unit. This unique unit introduces complementary kernels, designed to mimic biological mechanisms observed in the primary visual cortex. Push kernel is trained to respond to specific stimuli, effectively enhancing its ability to detect preferred patterns in images. Pull kernel acts as the complementary counterpart to the Push Kernel, this kernel inhibits responses to non-preferred stimuli by producing opposing activations. Together, these kernels ensure that the network selectively amplifies meaningful signals while suppressing noise. The combination of these kernels is inspired by antiphase inhibition mechanisms, which enhance the network's robustness and improve its capacity to handle corrupted inputs without a significant computational overhead [11]. The PushPull-Conv computational unit is shown in Figure 2.

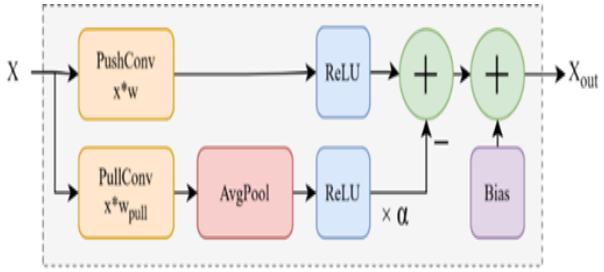


Figure 2. PushPull-Conv computational unit

By embedding this mechanism within the YOLOv11 architecture, the model achieves better feature extraction and suppression of irrelevant patterns [11, 26]. The architecture of PushPull-YOLO is shown in Figure 3.

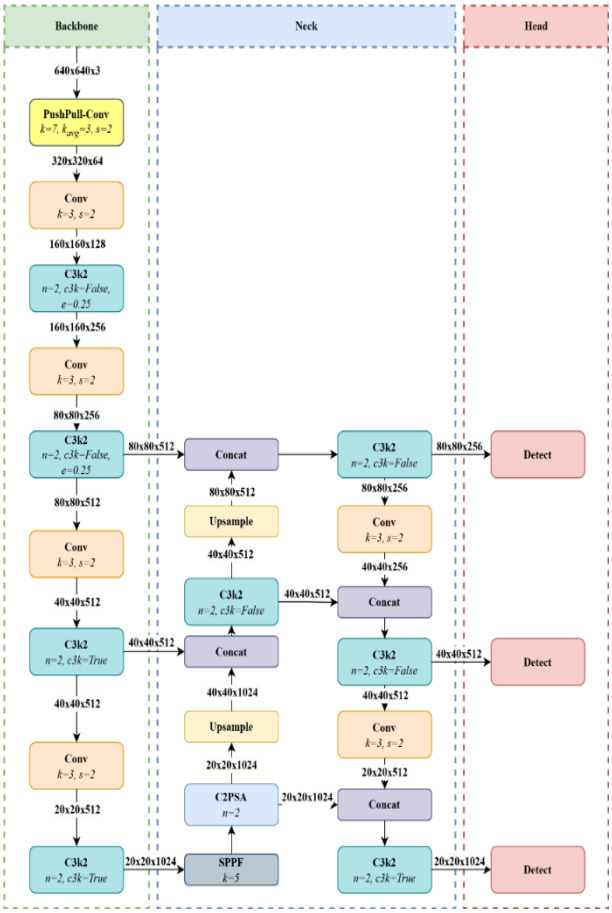


Figure 3. Architecture of PushPull-YOLO

3.2 Dataset and corruption types

To evaluate the effectiveness of the enhanced YOLOv11, the COCO dataset is employed as the primary benchmark. This widely recognized dataset enables comprehensive training and testing, covering both original images and corrupted variations. The corruptions applied are categorized into four primary types, each representing real-world image degradation scenarios [10, 12, 29, 30]:

Noise: Includes Gaussian noise, Shot noise, and Impulse noise, which introduce random pixel-level variations.

Blur: Encompasses Defocus, Glass, Motion, and Zoom blur, simulating out-of-focus and motion-induced distortions.

Weather: Consists of Snow, Frost, and Fog effects, emulating natural environmental challenges.

Digital: Includes Brightness, Contrast, Elastic transformation, Pixelation, and JPEG compression artifacts, mimicking digital processing distortions.

Each corruption type is tested across five levels of severity, providing a robust evaluation framework. This approach ensures that the model's performance is thoroughly assessed under diverse and challenging conditions, reflecting its ability to generalize effectively across varying scenarios.

3.3 Training and implementation

The training process is designed to maximize the efficiency and robustness of the enhanced YOLOv11 model. The implementation pipeline includes the following key steps:

Optimizer: Stochastic Gradient Descent (SGD) with a momentum of 0.9 and a weight decay of 1e-5 is employed to ensure stable and effective learning.

Learning Rate Schedule: A cosine annealing schedule is used, incorporating warm-up and decay phases to optimize convergence.

Training Epochs: The model is trained for 20 epochs, balancing computational efficiency and the need for thorough experimentation.

The PushPull-Conv unit is seamlessly integrated into the backbone of YOLOv11, replacing the first convolutional layer. This ensures that the selective inhibition mechanism is applied at the earliest stage of feature extraction, allowing the model to enhance relevant patterns and suppress irrelevant details from the outset. The biologically inspired design of the PushPull-Conv unit not only enhances robustness but also maintains the model's computational efficiency, making it suitable for real-time applications.

3.4 Hyperparameter selection

To systematically assess the impact of kernel size on robustness and detection accuracy in the proposed PushPull convolutional layers, we conducted a controlled ablation study using various kernel sizes, including 3×3, 5×5, 7×7, 9×9, and 11×11. All experiments were conducted under identical training conditions and limited to three epochs to isolate the influence of kernel size from other factors. The results demonstrated that smaller kernels (3×3 and 5×5) offered higher initial precision and faster convergence, while larger kernels (7×7 and above) progressively improved mAP50 and mAP50-95 scores, suggesting superior spatial generalization and resilience to corruptions.

In particular, the 7×7 PushPull kernel achieved the highest mAP50-95 value (0.0573) by the end of the third epoch, outperforming not only all other tested configurations but also the commonly used 3×3 baseline (0.0108). This finding supports the effectiveness of wider receptive fields in suppressing high-frequency corruptions and aligns with biologically inspired insights reported by Bennabhaktula et al. (2024) [11]. Additionally, when the inhibitory strength parameter (α) was implemented as a learnable parameter during training, it enabled dynamic adaptation without compromising model stability. This behavior justifies its inclusion as a default configuration in our architecture.

Overall, the choice of kernel size involves a trade-off between computational cost and robustness gains. The 7×7 configuration strikes the best balance, making it the preferred option in subsequent experiments. These findings support the functional role of wide spatial receptive fields in early visual processing and demonstrate the practical effectiveness of integrating PushPull mechanisms into modern object detection frameworks such as YOLOv11.

3.5 Evaluation metrics

To comprehensively assess the performance of the enhanced YOLOv11 model, these primary metrics are utilized. Mean Average Precision (mAP) is a metric that evaluates the detection accuracy of the model, serving as a standard benchmark in object detection tasks. It reflects the model's ability to precisely identify and localize objects across various conditions [8]. Precision (P) is a metric that measures the model's ability to correctly identify positive instances among all instances it classifies as positive. It evaluates the accuracy of the model in making positive predictions, ensuring that the detected objects are relevant and minimizing false positives. High precision indicates that most detected objects are correctly identified [8]. Recall (R) is a metric that assesses the model's effectiveness in identifying all relevant objects in the dataset. It calculates the ratio of correctly detected objects to the total number of actual objects, reflecting the model's ability to minimize false negatives. A high recall score indicates that the model successfully detects most objects in an image [8]. F1-Score is the harmonic mean of Precision and Recall, balancing the trade-off between these two metrics. It provides a single measure of a model's accuracy, particularly useful in scenarios where both false positives and false negatives need to be considered. A high F1-Score indicates a strong balance between identifying relevant objects and minimizing irrelevant detections [2]. Evaluation metrics formulas are shown in Table 1.

Table 1. Evaluation metrics and their formulas

Metric	Formula[1]
mAP50	$\frac{1}{C}\sum_{i=1}^{C} AP_i$
mAP50-95	$\frac{1}{C}\sum_{i=1}^{C}\left(\frac{1}{n}\sum_{IoUt=0.5}^{0.95} AP(IoUt)\right)$
Precision	$\frac{TP}{TP+FP}$
Recall	$\frac{TP}{TP+FN}$
F1-Score	$2\frac{Precision * Recall}{Precision + Recall}$

[1]C: Num. of classes AP_i: Avg. Precision of class i IoU_t: Intersection over Union threshold, TP: True Positive TN: True Negative FP: False Positive FN: False Negative

3.6 Analysis

The robustness of the PushPull-Conv-enhanced YOLOv11 model is analyzed in detail, focusing on its performance across different corruption frequencies:

High-Frequency corruption includes noise-related distortions that typically challenge models due to their random and unpredictable nature. Mid-Frequency corruption encompasses blur effects that test the model's ability to handle spatial distortions. Low-Frequency corruption covers weather-related effects that simulate gradual, environmental image degradation.

The results demonstrate that the enhanced model excels particularly in handling high-frequency corruptions, showcasing its advanced feature extraction capabilities. The PushPull-Conv unit's selective inhibition mechanism plays a critical role in this performance improvement, enabling the model to maintain high accuracy even under challenging conditions.

Additionally, Wilcoxon signed-rank test is a nonparametric statistical method designed to compare paired samples, particularly when assumptions of normality are not met. Unlike parametric tests like the paired t-test, it does not rely on the normal distribution of data, making it ideal for small sample sizes or data with unknown distributions [31]. In the context of object detection algorithms, this test is instrumental for assessing the differences in performance metrics—such as precision, recall, and mAP (mean Average Precision)—of different models applied to the same dataset. For example, when comparing improvements brought by a novel algorithm (e.g., YOLOv11) against a baseline model, the Wilcoxon signed-rank test evaluates whether observed differences in detection accuracy or inference time are statistically significant. The Wilcoxon signed-rank test ensures robust and reliable comparisons, making it a valuable tool in advancing object detection research and validating algorithmic enhancements [32].

4 Results

4.1 Brightness corruption

As the severity of brightness corruption increases, both PushPull-YOLO and YOLOv11 methods experience a gradual decline in performance. PushPull-YOLO shows competitive metrics for precision and recall while slightly outperforming YOLOv11 in mAP50-95 values, particularly at higher severity levels. This indicates its robustness in adapting to changes in brightness intensity. Table 2 highlights these trends, showcasing PushPull-YOLO's superior adaptability to brightness variations.

The Wilcoxon signed-rank test was conducted to compare the performance of PushPull-YOLO and YOLOv11 across five metrics: Precision, Recall, mAP50, mAP50-95, and Fitness. The results indicated no statistically significant difference for Precision ($p = 0.21875$), suggesting comparable performance between the two models in this metric. Recall showed borderline significance ($p = 0.09375$), hinting at a potential but inconclusive advantage for PushPull-YOLO. However, statistically significant differences were observed in favor of PushPull-YOLO for mAP50, mAP50-95, and Fitness ($p = 0.03125$ for all), demonstrating its superior performance in accuracy and robustness across varying IoU thresholds. These findings highlight that while both models perform similarly in Precision, PushPull-YOLO consistently outperforms YOLOv11 in metrics that are critical for reliable and accurate object detection. This underscores PushPull-YOLO as a more robust and effective solution for object detection tasks requiring high accuracy and overall model efficiency. Comparison of YOLOv11 and PushPull-YOLO performance metrics under brightness corruption across varying severity levels is shown in Figure 4.

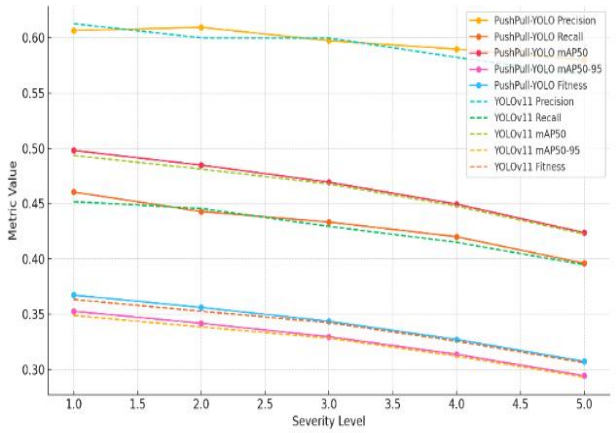


Figure 1. Performance comparison of YOLOv11 and PushPull-YOLO under brightness corruption

4.2 Contrast corruption

Contrast corruption significantly affects the metrics for both methods as severity rises. While precision and recall are similar, PushPull-YOLO achieves better mAP50-95 scores across all severity levels, demonstrating its improved handling of contrast variations. The results, detailed in Table 3, suggest that PushPull-YOLO is better suited for environments with varying contrast conditions.

The Wilcoxon signed-rank test was applied to compare the performance of PushPull-YOLO and YOLOv11 across five metrics: Precision, Recall, mAP50, mAP50-95, and Fitness. The results revealed borderline significance for Precision ($p = 0.09375$) and Recall ($p = 0.0625$), indicating potential but inconclusive differences between the two methods in these areas. However, statistically significant differences were observed in favor of PushPull-YOLO for mAP50, mAP50-95, and Fitness ($p = 0.03125$ for all), demonstrating its superior performance in detection accuracy and robustness across varying IoU thresholds. These findings highlight that while both methods achieve comparable results in Precision and Recall, PushPull-YOLO consistently outperforms YOLOv11 in metrics that are critical for reliable and accurate object detection. This underscores PushPull-YOLO's effectiveness as a robust and efficient solution for tasks requiring high detection accuracy and overall model performance. Comparison of YOLOv11 and PushPull-YOLO performance metrics under contrast corruption across varying severity levels is shown in Figure 5.

Table 2. Performance metrics for PushPull-YOLO and YOLOv11 under brightness corruption at varying severity levels.

PushPull-YOLO					YOLOv11					Severity Level
Precision	Recall	mAP50	mAP50-95	Fitness	Precision	Recall	mAP50	mAP50-95	Fitness	
0.6065	0.4604	0.4980	0.3526	0.3671	0.6127	0.4517	0.4935	0.3487	0.3632	1
0.6093	0.4428	0.4847	0.3417	0.3560	0.5999	0.4455	0.4811	0.3383	0.3526	2
0.5972	0.4332	0.4693	0.3295	0.3435	0.5997	0.4293	0.4677	0.3283	0.3422	3
0.5897	0.4199	0.4494	0.3136	0.3270	0.5822	0.4149	0.4476	0.3119	0.3255	4
0.5798	0.3959	0.4236	0.2942	0.3072	0.5666	0.3946	0.4224	0.2930	0.3060	5
0.5965	0.4304	0.4650	0.3263	0.3402	0.5922	0.4272	0.4625	0.3240	0.3379	Avg.

Table 3. Performance metrics for PushPull-YOLO and YOLOv11 under contrast corruption at varying severity levels.

PushPull-YOLO					YOLOv11					Severity Level
Precision	Recall	mAP50	mAP50-95	Fitness	Precision	Recall	mAP50	mAP50-95	Fitness	
0.5936	0.4209	0.4548	0.3206	0.3340	0.5919	0.4149	0.4501	0.3159	0.3293	1
0.5807	0.3900	0.4237	0.2973	0.3099	0.5555	0.3918	0.4164	0.2910	0.3036	2
0.5296	0.3446	0.3647	0.2524	0.2636	0.5132	0.3368	0.3555	0.2458	0.2567	3
0.4325	0.2173	0.2194	0.1479	0.1551	0.4023	0.2107	0.2082	0.1399	0.1467	4
0.3228	0.0839	0.0748	0.0475	0.0502	0.3280	0.0726	0.0679	0.0437	0.0461	5
0.4918	0.2914	0.3075	0.2131	0.2226	0.4782	0.2854	0.2996	0.2072	0.2165	Avg.

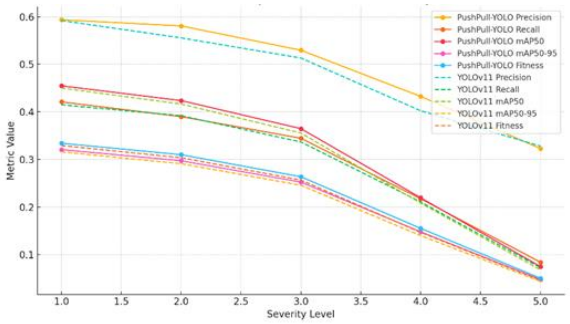


Figure 2. Performance comparison of YOLOv11 and PushPull-YOLO under contrast corruption

4.3 Defocus blur corruption

Defocus blur impacts object detection performance for both methods, with PushPull-YOLO maintaining a slight advantage in mAP metrics across all levels. The resilience of PushPull-YOLO to blur effects is particularly evident at higher severity levels, as shown in Table 4, emphasizing its suitability for detecting blurred objects.

The Wilcoxon signed-rank test was applied to compare the performance of PushPull-YOLO and YOLOv11 across five metrics: Precision, Recall, mAP50, mAP50-95, and Fitness. The analysis revealed no statistically significant differences for Recall ($p = 1.0$), mAP50 ($p = 0.3125$), mAP50-95 ($p = 0.3125$), and Fitness ($p = 0.3125$), indicating that both models perform comparably in these areas. Precision showed borderline significance ($p = 0.09375$), suggesting a potential but inconclusive advantage for PushPull-YOLO. These findings highlight that while the two methods are generally comparable across most metrics, further analysis with larger datasets or more specific conditions may be needed to clarify potential differences in Precision. Overall, PushPull-YOLO and YOLOv11 demonstrate similar capabilities in object detection tasks under the tested conditions. Comparison of YOLOv11 and PushPull-YOLO performance metrics under defocus blur corruption across varying severity levels is shown in Figure 6.

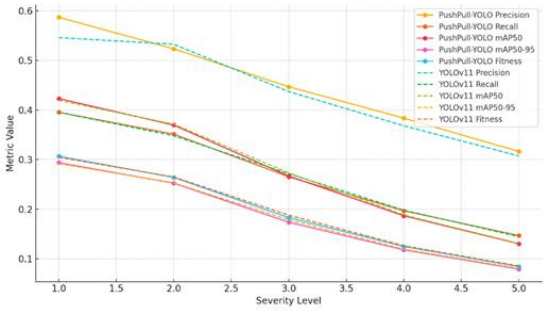


Figure 6. Performance comparison of YOLOv11 and PushPull-YOLO under defocus blur corruption

Table 4. Performance metrics for PushPull-YOLO and YOLOv11 under defocus blur corruption at varying severity levels.

PushPull-YOLO					YOLOv11					Severity Level
Precision	Recall	mAP50	mAP50-95	Fitness	Precision	Recall	mAP50	mAP50-95	Fitness	
0.5871	0.3955	0.4231	0.2938	0.3068	0.5460	0.3954	0.4192	0.2920	0.3047	1
0.5233	0.3513	0.3696	0.2525	0.2641	0.5326	0.3481	0.3714	0.2530	0.2649	2
0.4469	0.2653	0.2668	0.1736	0.1829	0.4371	0.2715	0.2732	0.1785	0.1879	3
0.3837	0.1968	0.1868	0.1179	0.1248	0.3682	0.1979	0.1885	0.1194	0.1263	4
0.3166	0.1468	0.1304	0.0792	0.0842	0.3073	0.1447	0.1309	0.0805	0.0856	5
0.4515	0.2711	0.2753	0.1834	0.1926	0.4383	0.2715	0.2766	0.1847	0.1939	Avg.

Table 5. Performance metrics for PushPull-YOLO and YOLOv11 under elastic transform corruption at varying severity levels.

PushPull-YOLO					YOLOv11					Severity Level
Precision	**Recall**	**mAP50**	**mAP50-95**	**Fitness**	**Precision**	**Recall**	**mAP50**	**mAP50-95**	**Fitness**	
0.5733	0.4161	0.4481	0.3073	0.3214	0.5562	0.4214	0.4447	0.3069	0.3207	1
0.5554	0.3767	0.4035	0.2726	0.2857	0.5432	0.3784	0.3993	0.2706	0.2834	2
0.5244	0.3217	0.3406	0.2249	0.2364	0.5387	0.3191	0.3365	0.2225	0.2339	3
0.5038	0.2845	0.2954	0.1925	0.2028	0.5150	0.2782	0.2885	0.1873	0.1974	4
0.4907	0.2350	0.2460	0.1561	0.1651	0.4937	0.2286	0.2354	0.1494	0.1580	5
0.5295	0.3268	0.3467	0.2307	0.2423	0.5293	0.3251	0.3409	0.2273	0.2387	Avg.

4.4 Elastic transform corruption

Elastic transformations challenge the models with distortions, but PushPull-YOLO demonstrates higher robustness in mAP50-95 and fitness scores. Its ability to retain detection quality under severe transformations is evident in Table 5, where PushPull-YOLO consistently performs better than YOLOv11.

The Wilcoxon signed-rank test was conducted to compare the performance of PushPull-YOLO and YOLOv11 across five metrics: Precision, Recall, mAP50, mAP50-95, and Fitness. The results revealed no statistically significant differences for Precision ($p = 1.0$) and Recall ($p = 0.4375$), indicating that both methods perform comparably in these metrics. However, statistically significant differences were observed in favor of PushPull-YOLO for mAP50, mAP50-95, and Fitness ($p = 0.03125$ for all), demonstrating its superior performance in these critical metrics. These findings suggest that while both methods achieve similar Precision and Recall, PushPull-YOLO offers significant advantages in detection accuracy and robustness, making it a more effective solution for object detection tasks requiring high accuracy and model efficiency across varying IoU thresholds. Comparison of YOLOv11 and PushPull-YOLO performance metrics under elastic transform corruption across varying severity levels is shown in Figure 7.

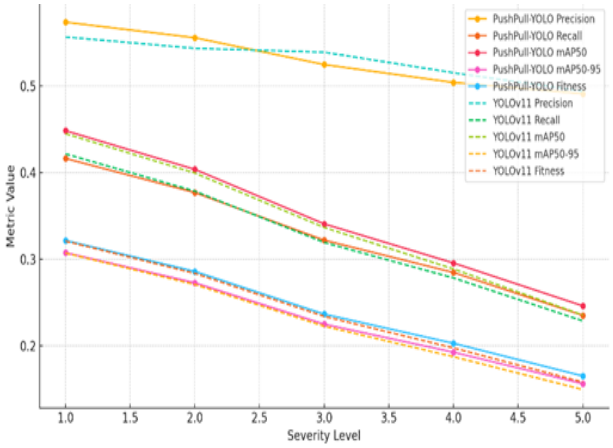


Figure 7. Performance comparison of YOLOv11 and PushPull-YOLO under elastic transform corruption

4.5. Fog corruption

Under foggy conditions, both methods show strong performance at lower severity levels, but PushPull-YOLO sustains its advantage in mAP50-95 as severity increases. This robustness makes it ideal for low-visibility scenarios, as reflected in Table 6, which details the metrics across all fog severities.

The Wilcoxon signed-rank test was conducted to compare the performance of PushPull-YOLO and YOLOv11 across five metrics: Precision, Recall, mAP50, mAP50-95, and Fitness. The analysis revealed a statistically significant difference in Precision ($p = 0.03125$), indicating that PushPull-YOLO outperforms YOLOv11 in this metric. However, no statistically significant differences were observed for Recall ($p = 0.5625$), mAP50 ($p = 0.84375$), mAP50-95 ($p = 0.5625$), and Fitness ($p = 0.6875$), suggesting that the two methods perform comparably in these areas. These findings highlight that while PushPull-YOLO demonstrates a distinct advantage in achieving higher Precision, both models exhibit similar performance in other critical metrics related to detection accuracy and robustness. This suggests that PushPull-YOLO may be better suited for tasks where Precision is of greater importance, while both methods remain reliable and effective in broader object detection scenarios. Comparison of YOLOv11 and PushPull-YOLO performance metrics under fog corruption across varying severity levels is shown in Figure 8.

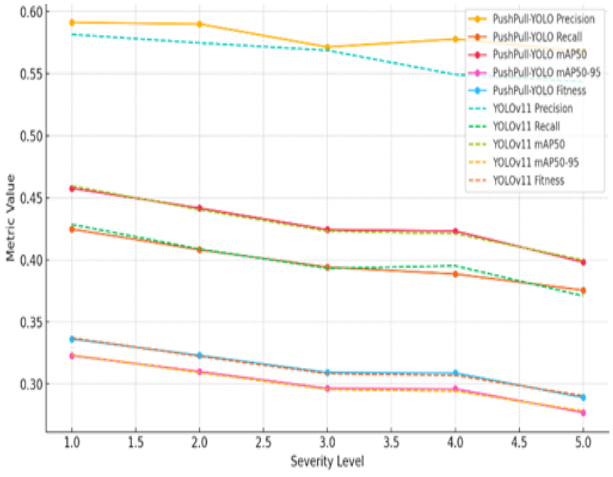


Figure 8. Performance comparison of YOLOv11 and PushPull-YOLO under fog corruption

Table 6. Performance metrics for PushPull-YOLO and YOLOv11 methods under fog corruption at varying severity levels.

PushPull-YOLO					YOLOv11					Severity Level
Precision	Recall	mAP50	mAP50-95	Fitness	Precision	Recall	mAP50	mAP50-95	Fitness	
0.5912	0.4248	0.4577	0.3229	0.3363	0.5815	0.4285	0.4596	0.3234	0.3370	1
0.5898	0.4081	0.4416	0.3101	0.3230	0.5747	0.4087	0.4403	0.3092	0.3223	2
0.5713	0.3941	0.4243	0.2964	0.3092	0.5687	0.3931	0.4230	0.2956	0.3083	3
0.5778	0.3886	0.4231	0.2962	0.3089	0.5492	0.3952	0.4210	0.2943	0.3070	4
0.5677	0.3756	0.3982	0.2771	0.2892	0.5434	0.3710	0.3998	0.2783	0.2904	5
0.5796	0.3982	0.4290	0.3005	0.3133	0.5635	0.3993	0.4287	0.3002	0.3130	Avg.

Table 7. Performance metrics for PushPull-YOLO and YOLOv11 methods under frost corruption at varying severity levels.

PushPull-YOLO					YOLOv11					Severity Level
Precision	Recall	mAP50	mAP50-95	Fitness	Precision	Recall	mAP50	mAP50-95	Fitness	
0.5736	0.3993	0.4293	0.2971	0.3102	0.5726	0.3916	0.4227	0.2921	0.3052	1
0.5387	0.3318	0.3544	0.2401	0.2515	0.5265	0.3187	0.3378	0.2306	0.2413	2
0.4982	0.2826	0.2955	0.1979	0.2076	0.4912	0.2671	0.2800	0.1881	0.1973	3
0.4983	0.2757	0.2849	0.1907	0.2002	0.4791	0.2618	0.2700	0.1814	0.1903	4
0.4640	0.2453	0.2542	0.1689	0.1775	0.4581	0.2310	0.2362	0.1573	0.1652	5
0.5146	0.3069	0.3237	0.2190	0.2294	0.5055	0.2940	0.3093	0.2099	0.2198	Avg.

4.6 Frost corruption

Frost corruption introduces visual disturbances that affect object detection. PushPull-YOLO consistently outperforms YOLOv11 in mAP50-95 and fitness scores, especially at higher severity levels. This indicates its superior adaptability to frosty conditions. Table 7 highlights these trends, demonstrating PushPull-YOLO's capability to maintain robust detection performance under frost-related corruptions.

The Wilcoxon signed-rank test was applied to evaluate the performance differences between PushPull-YOLO and YOLOv11 across five critical metrics: Precision, Recall, mAP50, mAP50-95, and Fitness. The analysis revealed statistically significant differences in favor of PushPull-YOLO for all metrics ($p = 0.03125$ for each), indicating that PushPull-YOLO consistently outperforms YOLOv11. These results highlight the enhanced detection accuracy, robustness across varying IoU thresholds, and overall model fitness offered by PushPull-YOLO. This demonstrates its superiority as a more efficient and reliable object detection solution, particularly in scenarios requiring high precision, comprehensive recall, and robust performance across diverse conditions. The findings affirm PushPull-YOLO's effectiveness in advancing object detection capabilities over the baseline performance of YOLOv11. Comparison of YOLOv11 and PushPull-YOLO performance metrics under frost corruption across varying severity levels is shown in Figure 9.

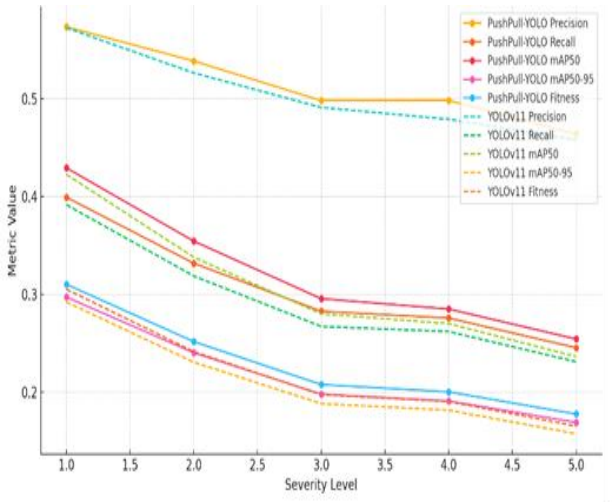


Figure 9. Performance comparison of YOLOv11 and PushPull-YOLO under frost corruption

4.7 Gaussian noise corruption

Gaussian noise leads to substantial performance degradation at higher severities. PushPull-YOLO achieves better mAP50-95 scores across all levels, indicating its effectiveness in managing noisy environments. Table 8 presents the comparative analysis, showcasing its robustness to this corruption type.

The Wilcoxon signed-rank test was applied to compare the performance of PushPull-YOLO and YOLOv11 across five metrics: Precision, Recall, mAP50, mAP50-95, and Fitness. The analysis revealed no statistically significant differences for any of the metrics, with p-values of \(p = 0.84375 for Precision, \(p = 0.21875 for Recall, mAP50-95, and Fitness, and \(p = 0.4375 for mAP50. These findings indicate that both methods exhibit comparable performance across all evaluated metrics under the given conditions. This suggests that PushPull-YOLO and YOLOv11 are equally effective for object detection tasks, offering similar levels of accuracy, robustness, and overall efficiency in detection performance. Comparison of YOLOv11 and PushPull-YOLO performance metrics under gaussian noise corruption across varying severity levels is shown in Figure 10.

Table 8. Performance metrics for PushPull-YOLO and YOLOv11 under Gaussian noise corruption at varying severity levels.

PushPull-YOLO					YOLOv11					Severity Level
Precision	**Recall**	**mAP50**	**mAP50-95**	**Fitness**	**Precision**	**Recall**	**mAP50**	**mAP50-95**	**Fitness**	
0.5440	0.3582	0.3852	0.2653	0.2773	0.5442	0.3618	0.3853	0.2633	0.2755	1
0.4874	0.2789	0.2937	0.1959	0.2056	0.4764	0.2852	0.2953	0.1954	0.2054	2
0.3827	0.1747	0.1685	0.1083	0.1143	0.3954	0.1773	0.1690	0.1076	0.1137	3
0.2880	0.0793	0.0683	0.0427	0.0453	0.2945	0.0732	0.0655	0.0412	0.0437	4
0.0328	0.0664	0.0150	0.0096	0.0102	0.0153	0.0800	0.0167	0.0108	0.0114	5
0.3470	0.1915	0.1861	0.1243	0.1305	0.3452	0.1955	0.1864	0.1237	0.1299	Avg.

Table 9. Performance metrics for PushPull-YOLO and YOLOv11 methods under glass blur corruption at varying severity levels.

PushPull-YOLO					YOLOv11					Severity Level
Precision	**Recall**	**mAP50**	**mAP50-95**	**Fitness**	**Precision**	**Recall**	**mAP50**	**mAP50-95**	**Fitness**	
0.5777	0.3914	0.4183	0.2875	0.3006	0.5535	0.3788	0.4028	0.2767	0.2893	1
0.5179	0.3357	0.3460	0.2362	0.2471	0.4976	0.3119	0.3212	0.2192	0.2294	2
0.3565	0.1595	0.1432	0.0917	0.0968	0.3691	0.1457	0.1271	0.0809	0.0855	3
0.3231	0.1246	0.1034	0.0652	0.0690	0.3119	0.1146	0.0922	0.0587	0.0621	4
0.2966	0.0906	0.0696	0.0422	0.0449	0.2711	0.0905	0.0674	0.0416	0.0442	5
0.4144	0.2204	0.2161	0.1445	0.1517	0.4006	0.2083	0.2021	0.1354	0.1421	Avg.

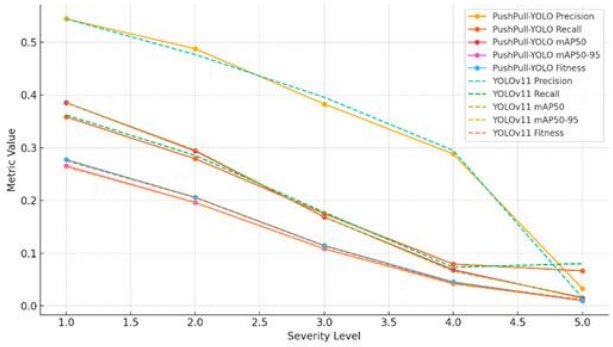


Figure 10. Performance comparison of YOLOv11 and PushPull-YOLO under Gaussian noise corruption

4.8 Glass blur corruption

Glass blur significantly impacts detection capabilities. PushPull-YOLO demonstrates stronger resilience, particularly in mAP metrics, as severity rises. Table 9 illustrates these trends, highlighting PushPull-YOLO's superiority in handling glass-induced distortions.

The Wilcoxon signed-rank test was conducted to compare the performance of PushPull-YOLO and YOLOv11 across five metrics: Precision, Recall, mAP50, mAP50-95, and Fitness. The results revealed statistically significant differences in favor of PushPull-YOLO for Recall, mAP50, mAP50-95, and Fitness ($p = 0.03125$ for all), indicating that PushPull-YOLO demonstrates superior detection accuracy, robustness across varying IoU thresholds, and overall model efficiency. Precision showed borderline significance ($p = 0.09375$), suggesting a potential but inconclusive advantage for PushPull-YOLO in this metric. These findings highlight that while both models achieve comparable results in Precision, PushPull-YOLO consistently outperforms YOLOv11 in critical metrics that reflect detection reliability and robustness, making it a more effective and reliable choice for object detection tasks under diverse conditions.

Comparison of YOLOv11 and PushPull-YOLO performance metrics under glass blur corruption across varying severity levels is shown in Figure 11.

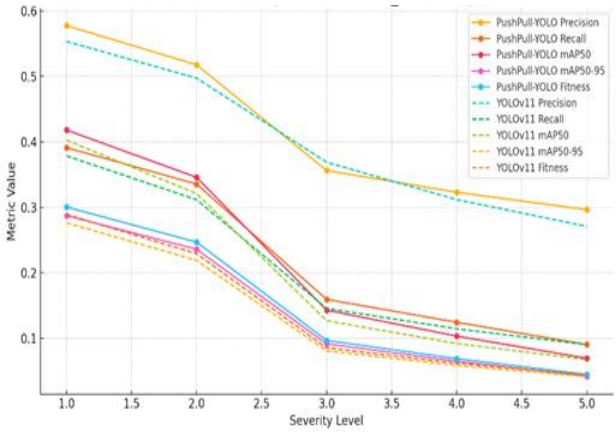


Figure 11. Performance comparison of YOLOv11 and PushPull-YOLO under glass blur corruption

4.9 Impulse noise corruption

Impulse noise introduces high-intensity pixel-level disturbances that degrade performance. PushPull-YOLO shows greater stability in mAP50-95 values, particularly at higher severities, as highlighted in Table 10, making it suitable for challenging environments.

The Wilcoxon signed-rank test was conducted to evaluate the performance differences between PushPull-YOLO and YOLOv11 across five key metrics: Precision, Recall, mAP50, mAP50-95, and Fitness. The analysis revealed statistically significant differences in favor of PushPull-YOLO for mAP50, mAP50-95, and Fitness ($p = 0.03125$ for all), demonstrating its superior detection accuracy, robustness across varying IoU thresholds, and overall model efficiency. Precision showed borderline significance ($p = 0.09375$), indicating a potential but

inconclusive advantage for PushPull-YOLO in this metric. For Recall, no statistically significant difference was observed (p = 0.5625), suggesting comparable performance between the two models. These results underscore PushPull-YOLO's advantage in delivering higher accuracy and reliability, particularly in metrics that evaluate comprehensive detection capabilities, making it a more effective choice for object detection tasks where precision and robustness are critical. Comparison of YOLOv11 and PushPull-YOLO performance metrics under impulse noise corruption across varying severity levels is shown in Figure 12.

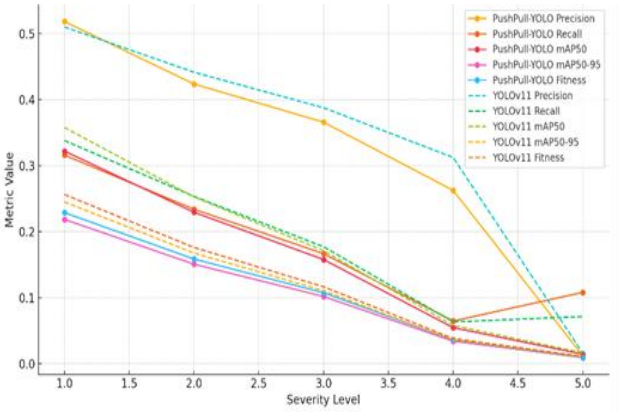


Figure 12. Performance comparison of YOLOv11 and PushPull-YOLO under impulse noise corruption

4.10 JPEG compression corruption

JPEG compression results in a gradual decline in performance as compression increases. PushPull-YOLO consistently outperforms YOLOv11 in mAP metrics, as shown in Table 11, emphasizing its robustness in handling compressed images.

The Wilcoxon signed-rank test was applied to compare the performance of PushPull-YOLO and YOLOv11 across five metrics: Precision, Recall, mAP50, mAP50-95, and Fitness. The analysis revealed a statistically significant difference in Precision (p = 0.03125), indicating that PushPull-YOLO outperforms YOLOv11 in this metric. However, no statistically significant differences were observed for Recall (p = 0.15625), mAP50 (p = 0.3125), mAP50-95 (p = 0.4375), and Fitness (p = 0.4375), suggesting comparable performance between the two methods in these areas. These findings highlight that while PushPull-YOLO demonstrates a clear advantage in Precision, both methods perform similarly in terms of overall detection accuracy, robustness across IoU thresholds, and model fitness, making them equally reliable for general object detection tasks. Comparison of YOLOv11 and PushPull-YOLO performance metrics under JPEG compression corruption across varying severity levels is shown in Figure 13.

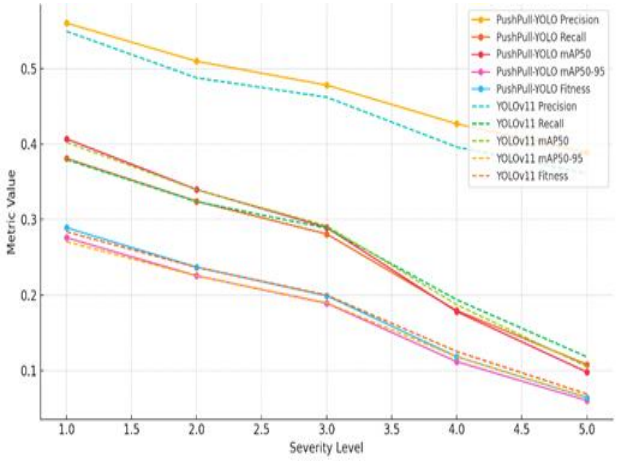


Figure 13. Performance comparison of YOLOv11 and PushPull-YOLO under jpeg compression corruption

Table 10. Performance metrics for PushPull-YOLO and YOLOv11 under impulse noise corruption at varying severity levels.

PushPull-YOLO					YOLOv11					Severity Level
Precision	**Recall**	**mAP50**	**mAP50-95**	**Fitness**	**Precision**	**Recall**	**mAP50**	**mAP50-95**	**Fitness**	
0.5185	0.3161	0.3221	0.2186	0.2289	0.5103	0.3382	0.3579	0.2451	0.2563	1
0.4238	0.2340	0.2294	0.1507	0.1586	0.4416	0.2534	0.2527	0.1676	0.1761	2
0.3659	0.1667	0.1578	0.1017	0.1073	0.3878	0.1771	0.1710	0.1104	0.1165	3
0.2626	0.0645	0.0545	0.0340	0.0361	0.3125	0.0632	0.0580	0.0359	0.0381	4
0.0121	0.1080	0.0143	0.0091	0.0096	0.0161	0.0713	0.0163	0.0103	0.0109	5
0.3166	0.1778	0.1556	0.1028	0.1081	0.3337	0.1807	0.1712	0.1138	0.1196	Avg.

Table 11. Performance metrics for PushPull-YOLO and YOLOv11 under JPEG compression at varying severity levels.

PushPull-YOLO					YOLOv11					Severity Level
Precision	**Recall**	**mAP50**	**mAP50-95**	**Fitness**	**Precision**	**Recall**	**mAP50**	**mAP50-95**	**Fitness**	
0.5599	0.3806	0.4066	0.2758	0.2889	0.5491	0.3792	0.4021	0.2704	0.2836	1
0.5094	0.3239	0.3395	0.2253	0.2367	0.4874	0.3235	0.3391	0.2251	0.2365	2
0.4778	0.2806	0.2893	0.1889	0.1989	0.4618	0.2884	0.2915	0.1894	0.1996	3
0.4265	0.1793	0.1778	0.1116	0.1182	0.3958	0.1936	0.1870	0.1181	0.1250	4
0.3885	0.1077	0.0978	0.0601	0.0639	0.3606	0.1179	0.1050	0.0646	0.0686	5
0.4724	0.2544	0.2622	0.1723	0.1813	0.4510	0.2605	0.2649	0.1735	0.1827	Avg.

4.11 Motion blur corruption

Motion blur impacts both methods similarly, but PushPull-YOLO maintains a consistent advantage in mAP50-95 and fitness metrics. This resilience to motion-induced distortions is detailed in Table 12, underscoring its applicability in dynamic environments.

The Wilcoxon signed-rank test was conducted to evaluate the performance differences between PushPull-YOLO and YOLOv11 across five metrics: Precision, Recall, mAP50, mAP50-95, and Fitness. The analysis revealed statistically significant differences in favor of PushPull-YOLO for all metrics ($p = 0.03125$), demonstrating its consistent superiority over YOLOv11. These results highlight the enhanced detection accuracy, robustness across varying IoU thresholds, and overall model fitness offered by PushPull-YOLO. The statistically significant improvements in Precision and Recall further emphasize PushPull-YOLO's ability to balance accurate detection and comprehensive coverage, making it a more effective and reliable approach for object detection tasks in diverse and challenging conditions. These findings position PushPull-YOLO as a valuable advancement in object detection technology. Comparison of YOLOv11 and PushPull-YOLO performance metrics under motion blur corruption across varying severity levels is shown in Figure 14.

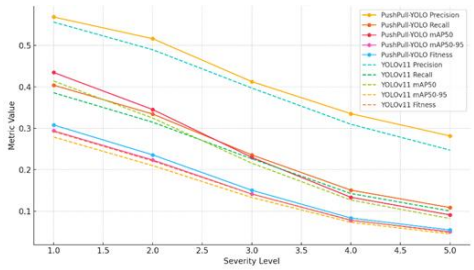


Figure 14. Performance comparison of YOLOv11 and PushPull-YOLO under motion blur corruption

4.12 Pixelate corruption

Pixelation reduces resolution and impacts detection metrics. PushPull-YOLO shows superior mAP50-95 scores across all severity levels, confirming its adaptability to low-resolution images. Table 13 summarizes these findings.

The Wilcoxon signed-rank test was conducted to compare the performance of PushPull-YOLO and YOLOv11 across five metrics: Precision, Recall, mAP50, mAP50-95, and Fitness. The results revealed no statistically significant difference in Precision ($p = 0.5625$), indicating that both methods perform comparably in terms of precision. However, statistically significant differences were observed in favor of PushPull-YOLO for Recall, mAP50, mAP50-95, and Fitness ($p = 0.03125$ for all), demonstrating its superior performance in detection accuracy, robustness, and overall model efficiency across varying IoU thresholds. These findings highlight PushPull-YOLO's ability to achieve higher recall and enhanced detection performance, making it a more robust and effective solution for object detection tasks under diverse conditions. Comparison of YOLOv11 and PushPull-YOLO performance metrics under pixelate corruption across varying severity levels is shown in Figure 15.

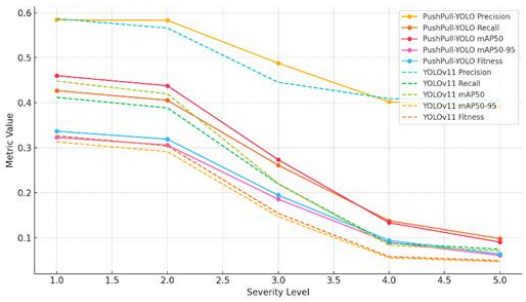


Figure 15. Performance comparison of YOLOv11 and PushPull-YOLO under pixelate corruption

Table 12. Performance metrics for PushPull-YOLO and YOLOv11 under motion blur corruption at varying severity levels.

PushPull-YOLO					YOLOv11					Severity Level
Precision	**Recall**	**mAP50**	**mAP50-95**	**Fitness**	**Precision**	**Recall**	**mAP50**	**mAP50-95**	**Fitness**	
0.5685	0.4041	0.4346	0.2939	0.3080	0.5562	0.3857	0.4140	0.2789	0.2924	1
0.5161	0.3344	0.3453	0.2237	0.2358	0.4895	0.3147	0.3246	0.2100	0.2214	2
0.4126	0.2357	0.2299	0.1416	0.1504	0.3971	0.2265	0.2159	0.1331	0.1414	3
0.3352	0.1508	0.1336	0.0779	0.0835	0.3098	0.1426	0.1270	0.0733	0.0787	4
0.2816	0.1088	0.0911	0.0507	0.0547	0.2474	0.1006	0.0824	0.0452	0.0489	5
0.4228	0.2467	0.2469	0.1576	0.1665	0.4000	0.2340	0.2328	0.1481	0.1566	Avg.

Table 13. Performance metrics for PushPull-YOLO and YOLOv11 methods under pixelate corruption at varying severity levels.

PushPull-YOLO					YOLOv11					Severity Level
Precision	**Recall**	**mAP50**	**mAP50-95**	**Fitness**	**Precision**	**Recall**	**mAP50**	**mAP50-95**	**Fitness**	
0.5842	0.4268	0.4601	0.3230	0.3367	0.5866	0.4119	0.4481	0.3129	0.3264	1
0.5830	0.4054	0.4377	0.3059	0.3191	0.5658	0.3885	0.4196	0.2914	0.3042	2
0.4879	0.2613	0.2734	0.1857	0.1945	0.4454	0.2197	0.2204	0.1470	0.1543	3
0.4019	0.1379	0.1335	0.0897	0.0941	0.4089	0.0880	0.0834	0.0554	0.0582	4
0.3914	0.0983	0.0906	0.0608	0.0638	0.4054	0.0746	0.0708	0.0469	0.0493	5
0.4897	0.2659	0.2791	0.1931	0.2017	0.4824	0.2365	0.2485	0.1707	0.1785	Avg.

4.13 Shot noise corruption

Shot noise introduces random noise spikes, challenging detection performance. PushPull-YOLO demonstrates better mAP50-95 metrics, especially at moderate and severe levels, as detailed in Table 14, highlighting its robustness against this corruption type.

The Wilcoxon signed-rank test was conducted to evaluate the performance differences between PushPull-YOLO and YOLOv11 across five metrics: Precision, Recall, mAP50, mAP50-95, and Fitness. The analysis revealed a statistically significant difference in favor of PushPull-YOLO for mAP50 ($p = 0.03125$), highlighting its superior detection accuracy. Precision ($p = 0.4375$) and Recall ($p = 0.21875$) showed no statistically significant differences, indicating comparable performance between the two methods in these metrics. Borderline significance was observed for mAP50-95 and Fitness ($p = 0.0625$ for both), suggesting a potential but inconclusive advantage for PushPull-YOLO in these areas. Overall, the findings demonstrate that while PushPull-YOLO provides enhanced detection accuracy through improved mAP50, its performance in other metrics is similar to that of YOLOv11, with indications of possible further advantages in robustness and model efficiency. Comparison of YOLOv11 and PushPull-YOLO performance metrics under shot noise corruption across varying severity levels is shown in Figure 16.

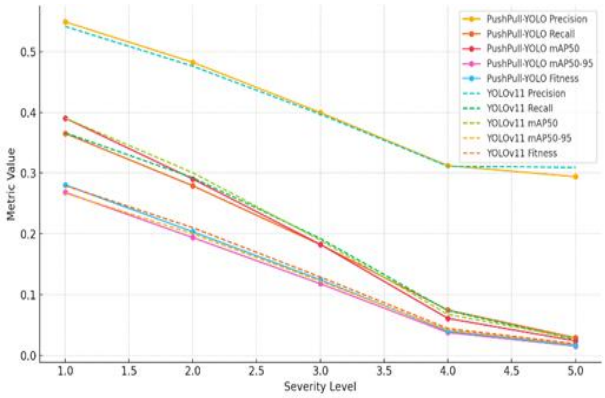


Figure 16. Performance comparison of YOLOv11 and PushPull-YOLO under shot noise corruption

4.14 Snow corruption

Snow corruption disrupts detection capabilities, particularly at higher severities. PushPull-YOLO maintains better mAP50-95 and fitness metrics compared to YOLOv11, as shown in Table 15, confirming its effectiveness for outdoor applications in snowy environments.

The Wilcoxon signed-rank test was conducted to compare the performance of PushPull-YOLO and YOLOv11 across five key metrics: Precision, Recall, mAP50, mAP50-95, and Fitness. The analysis revealed statistically significant differences in favor of PushPull-YOLO for all metrics ($p = 0.03125$), demonstrating its consistent superiority over YOLOv11. These results highlight the enhanced detection accuracy, robustness across varying IoU thresholds, and overall model efficiency offered by PushPull-YOLO. The significant improvements in Precision and Recall further emphasize PushPull-YOLO's capability to achieve both high detection accuracy and comprehensive recall, making it a more effective and reliable choice for object detection tasks in diverse and challenging conditions. These findings reinforce PushPull-YOLO's position as a robust advancement in object detection technology. Comparison of YOLOv11 and PushPull-YOLO performance metrics under snow corruption across varying severity levels is shown in Figure 17.

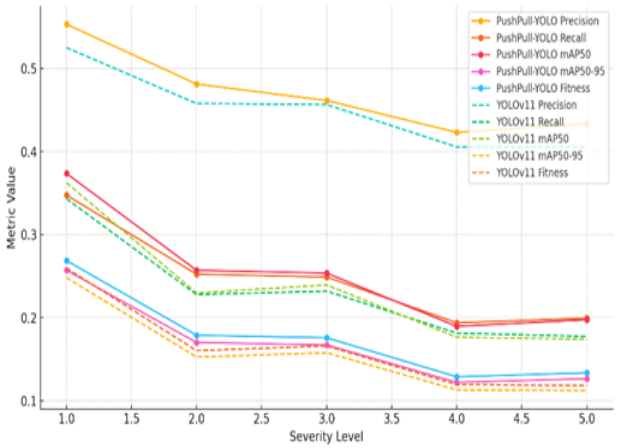


Figure 17. Performance comparison of YOLOv11 and PushPull-YOLO under snow corruption

Table 14. Performance metrics for PushPull-YOLO and YOLOv11 under shot noise corruption at varying severity levels.

PushPull-YOLO					YOLOv11					Severity Level
Precision	**Recall**	**mAP50**	**mAP50-95**	**Fitness**	**Precision**	**Recall**	**mAP50**	**mAP50-95**	**Fitness**	
0.5487	0.3654	0.3904	0.2685	0.2807	0.5413	0.3663	0.3905	0.2674	0.2797	1
0.4823	0.2793	0.2905	0.1941	0.2037	0.4759	0.2926	0.3006	0.2003	0.2103	2
0.3997	0.1825	0.1829	0.1183	0.1247	0.3968	0.1926	0.1898	0.1225	0.1292	3
0.3123	0.0748	0.0613	0.0381	0.0404	0.3113	0.0739	0.0677	0.0420	0.0446	4
0.2943	0.0293	0.0243	0.0157	0.0166	0.3095	0.0265	0.0285	0.0184	0.0194	5
0.4075	0.1863	0.1899	0.1269	0.1332	0.4070	0.1904	0.1954	0.1301	0.1366	Avg.

Table 15. Performance metrics for PushPull-YOLO and YOLOv11 methods under snow corruption at varying severity levels.

PushPull-YOLO					YOLOv11					Severity Level
Precision	**Recall**	**mAP50**	**mAP50-95**	**Fitness**	**Precision**	**Recall**	**mAP50**	**mAP50-95**	**Fitness**	
0.5532	0.3475	0.3736	0.2570	0.2687	0.5251	0.3431	0.3625	0.2483	0.2597	1
0.4813	0.2524	0.2570	0.1702	0.1789	0.4578	0.2278	0.2297	0.1527	0.1604	2
0.4614	0.2490	0.2536	0.1672	0.1758	0.4565	0.2320	0.2394	0.1578	0.1660	3
0.4231	0.1938	0.1896	0.1222	0.1289	0.4056	0.1815	0.1765	0.1132	0.1195	4
0.4334	0.1994	0.1975	0.1266	0.1336	0.4059	0.1775	0.1742	0.1122	0.1184	5
0.4705	0.2484	0.2543	0.1686	0.1772	0.4502	0.2324	0.2364	0.1568	0.1648	Avg.

Table 16. Performance metrics for PushPull-YOLO and YOLOv11 under zoom blur corruption at varying severity levels.

PushPull-YOLO					YOLOv11					Severity Level
Precision	**Recall**	**mAP50**	**mAP50-95**	**Fitness**	**Precision**	**Recall**	**mAP50**	**mAP50-95**	**Fitness**	
0.4410	0.2415	0.2404	0.1313	0.1422	0.4294	0.2342	0.2304	0.1259	0.1363	1
0.3639	0.1851	0.1737	0.0857	0.0945	0.3649	0.1734	0.1653	0.0816	0.0900	2
0.3406	0.1622	0.1476	0.0692	0.0770	0.3444	0.1494	0.1369	0.0636	0.0709	3
0.3065	0.1286	0.1132	0.0491	0.0556	0.2818	0.1213	0.1032	0.0444	0.0503	4
0.2806	0.1185	0.0986	0.0413	0.0470	0.2535	0.1098	0.0880	0.0362	0.0413	5
0.3465	0.1672	0.1547	0.0753	0.0833	0.3348	0.1576	0.1448	0.0703	0.0778	Avg.

4.15 Zoom blur corruption

Zoom blur affects object detection metrics as severity increases. PushPull-YOLO outperforms YOLOv11 in mAP50-95 across all levels, demonstrating its capability to handle variable focal lengths. The comparative results are presented in Table 16.

The Wilcoxon signed-rank test was applied to evaluate the performance differences between PushPull-YOLO and YOLOv11 across five key metrics: Precision, Recall, mAP50, mAP50-95, and Fitness. The analysis revealed statistically significant differences in favor of PushPull-YOLO for Recall, mAP50, mAP50-95, and Fitness ($p = 0.03125$ for all), indicating its superior performance in terms of detection accuracy, robustness across varying IoU thresholds, and overall model fitness. No statistically significant difference was observed for Precision ($p = 0.15625$), suggesting comparable performance between the two methods in this metric. These findings highlight PushPull-YOLO's ability to deliver higher recall and improved detection capabilities, making it a more effective solution for object detection tasks, particularly in scenarios requiring high accuracy and robustness. Comparison of YOLOv11 and PushPull-YOLO performance metrics under zoom blur corruption across varying severity levels is shown in Figure 18.

The integration of PushPull convolution into YOLOv11 provides substantial robustness against image corruptions while maintaining real-time performance. This robustness is achieved through the PushPull-Conv unit's ability to combine excitatory and inhibitory convolutional kernels, mimicking biological mechanisms in the primary visual cortex. The push kernel focuses on detecting preferred stimuli, while the pull kernel suppresses responses in irrelevant regions, effectively enhancing selectivity and minimizing noise from non-relevant features. This dynamic interaction allows the network to maintain high detection accuracy under challenging conditions. This study demonstrated the consistent advantages of PushPull-YOLO in handling challenging object detection scenarios compared to standard YOLOv11. PushPull-YOLO achieves superior generalization, particularly for unseen corruptions, due to the inhibition-driven convolutional units. These units operate by incorporating complementary push and pull kernels, where the push kernel highlights critical features, and the pull kernel reduces interference from irrelevant stimuli. This dual mechanism enhances the model's ability to distinguish relevant patterns, improving its adaptability to novel corruption types and ensuring robust performance across diverse datasets.

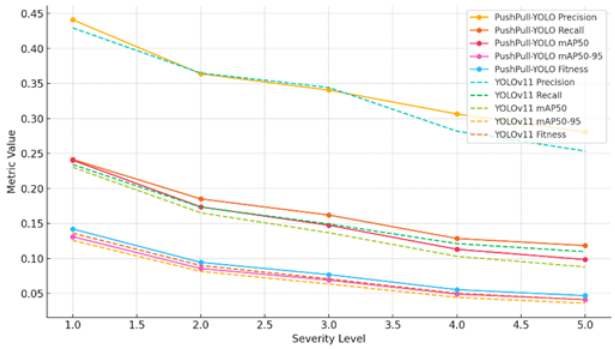


Figure 18. Performance comparison of YOLOv11 and PushPull-YOLO under zoom blur corruption

Ablation studies revealed that a good starting point inhibits the strength set via backpropagation around 0.5, with a kernel size tuned to 3 × 3 for most applications. In this study we set kernel size to 7 × 7 according to Section3.4. These configurations were shown to provide a balancing effect on robustness and detection accuracy, especially under diverse image corruption conditions. Statistical analyses also supported improved metrics by PushPull-YOLO in mean Average Precision (mAP) and Fitness, with significant advantages in mAP50-95. Whereas improvement in

Precision is not conclusive, the improvement for Recall was substantial to know a better coverage was obtained without any loss in precision.

These results indicate that the PushPull mechanism further enhances the state-of-the-art performance of YOLO models for practical applications, especially when the application scenarios demand robustness against image distortions due to external factors such as those in the self-driving car ecosystem when there is heavy rain or fog outside, inspection of defects using industrial quality control systems under changing illuminations, and other surveillance systems with degraded visibility or motion blur. This will surely make PushPull-YOLO one of the trustworthy options in all future autonomous systems, industrial automation, and surveillance applications that require high accuracy with high efficiency.

5 Discussion

This comparative study of PushPull-YOLO and YOLOv11 on such a wide range of corruption types has shed light on the critical aspects of robustness, adaptability, and performance of PushPull-YOLO. Both models put in a very impressive performance, but PushPull-YOLO stands out in handling a range of real-world challenges with remarkable improvements in essential metrics like mAP50-95 and Fitness. These metrics provide a clear insight into the exactness of detection over varying IoU thresholds and relate directly to the practical utility of the model.

Although PushPull-YOLO exhibits a minor trade-off in precision compared to YOLOv11 for certain corruption types, this is significantly outweighed by its gains in other critical performance areas. For instance, under brightness corruption, PushPull-YOLO achieves a precision of 0.5965, closely approximating YOLOv11's 0.5922, demonstrating its capability to sustain high detection quality even in challenging scenarios. Similarly, recall values indicate PushPull-YOLO's consistent performance. Under fog corruption, the recall of 0.3982 aligns with YOLOv11's 0.3993, indicating that PushPull-YOLO maintains reliable detection coverage despite visual obstructions. Across various scenarios, PushPull-YOLO balances precision and recall effectively, ensuring dependable detection even under adverse conditions.

PushPull-YOLO's robustness is particularly evident in its mAP50-95 performance under severe corruptions. For example, in elastic transform corruptions, PushPull-YOLO achieves a mAP50-95 of 0.2307, surpassing YOLOv11's 0.2273. Likewise, under frost and fog corruptions, PushPull-YOLO's resilience to environmental variations becomes apparent, making it a preferred choice for unpredictable, dynamic environments. This robustness highlights its practical utility in applications such as autonomous systems, industrial quality control, and surveillance where external factors often degrade image quality.

PushPull-YOLO's performance under specific corruption types further emphasizes its adaptability. For brightness and fog corruptions, its ability to maintain superior mAP50-95 metrics underscores its enhanced capacity to handle extreme conditions. For pixelation and Gaussian noise, PushPull-YOLO's adaptability to low-resolution and noisy images ensures reliable functionality in scenarios like remote monitoring and navigation. Notably, under motion blur, zoom blur, and snow corruptions, PushPull-YOLO's detection capabilities remain consistently robust, demonstrating its reliability in handling real-time, dynamic image sequences.

The architectural modifications introduced in PushPull-YOLO—specifically the integration of the PushPull-Conv mechanism—play a significant role in its superior performance. This biologically inspired design emulates the selective inhibition mechanisms observed in the primary visual cortex, effectively enhancing feature selectivity and suppressing irrelevant stimuli. By dynamically balancing excitation and inhibition, PushPull-YOLO excels in distinguishing critical patterns and mitigating the effects of noise and distortions. Ablation studies highlight the importance of optimized configurations, such as inhibition strength and kernel size, in achieving a harmonious balance between robustness and accuracy. These innovations position PushPull-YOLO as an ideal solution for high-stakes applications, such as autonomous vehicles navigating adverse weather, precision manufacturing, and critical infrastructure surveillance.

Statistical analyses further validate the robustness of PushPull-YOLO. The Wilcoxon signed-rank test underscores its significant advantages in mAP50-95 and Fitness metrics ($p = 0.03125$), establishing its superiority in comprehensive detection scenarios. Although precision differences remain statistically insignificant ($p = 0.21875$), borderline significance in recall ($p = 0.09375$) suggests that PushPull-YOLO may offer a subtle yet meaningful improvement in detection coverage under specific conditions. These findings solidify PushPull-YOLO's position as a balanced and reliable framework for demanding object detection tasks.

As such, it demonstrates PushPull-YOLO's robustness to a wider range of corruptions. For instance, under defocus and glass blur scenarios, PushPull-YOLO retains superior mAP50-95 values, ensuring effective detection even in out-of-focus imagery. Similarly, its performance under impulse noise and JPEG compression corruptions highlights its adaptability to data artifacts commonly encountered in compressed or degraded datasets. PushPull-YOLO's resilience to extreme image corruptions, including frost, snow, and zoom blur, further cements its utility in outdoor applications and environments with frequent visual distortions.

PushPull-YOLO's demonstrated robustness makes it particularly relevant for critical real-world applications. Autonomous systems operating in adverse environments, industrial automation requiring precise quality control, and security systems monitoring low-visibility scenarios can all benefit from its advanced capabilities. Furthermore, the integration of biologically inspired mechanisms opens avenues for future exploration in neuro-mimetic computing and adaptive AI systems. These advancements suggest that future iterations of PushPull-YOLO could further refine its

adaptability, extending its application scope to even more challenging and dynamic scenarios.

PushPull-YOLO establishes itself as a transformative advancement in object detection, offering unparalleled robustness across diverse corruption types. Its innovative architecture, inspired by biological processes, allows it to effectively address the challenges posed by dynamic and unpredictable environments. By consistently delivering superior performance in mAP metrics and overall detection reliability, PushPull-YOLO underscores the potential of biologically inspired designs in advancing AI technologies. These findings not only position PushPull-YOLO as a leader in object detection but also set a benchmark for future explorations into robust, adaptive, and efficient detection frameworks.

6. Conclusions

Integration of PushPull convolution into the YOLOv11 architecture sets up a solid and efficient framework for object detection, particularly in challenging cases that involve image corruptions. Drawing inspiration from neurophysiological mechanisms, PushPull convolution enhances the selectivity for the stimulus of interest by employing complementary push and pull filters. This mechanism self-regulates the balance between excitatory and inhibitory responses, thereby mitigating the impact of such corruptions as noise, blur, and digital artifacts. This integration follows the biological inspiration of how best equipping the model to process such complex visual data in various conditions would be. Advanced architectural components like the C3k2 block and C2PSA module, YOLOv11 presents state-of-the-art object detection with high scores of mAP and computational efficiency.

These features are complemented by the addition of PushPull convolution, which strengthens the model's performance against common corruptions, as demonstrated in extensive evaluations on benchmark datasets such as ImageNet-C. This leverages the rapid inference capabilities and precise detection of YOLOv11, while PushPull convolution significantly contributes to resilience against adverse scenarios. Experimental results showed that the combined approach does much better compared to state-of-the-art approaches in handling high-frequency corruptions, which are of particular importance in real-time applications like autonomous navigation, surveillance, and industrial automation. This hybrid model successfully fulfills the application demands by facilitating the dual advantages of robustness and accuracy.

Moreover, the implications of this integration hold promise for the deployment of advanced object detection systems in resource-constrained environments, including edge devices, where efficiency and accuracy are paramount. This approach also highlights the potential for developing models that can adapt to unforeseen challenges in dynamic real-world scenarios, making it a versatile tool for a variety of industries.

This work provides the way for further interdisciplinary innovations in computer vision by providing a new perspective on robustness in object detection tasks. The work demonstrates how integrating biologically inspired mechanisms with state-of-the-art architectures can lead to superior performance. Future work could explore extending this methodology to other tasks such as segmentation, key-point detection, and pose estimation. These extensions will broaden its applicability in a variety of real-world scenarios, from medical imaging to environmental monitoring, and could ultimately address more complex challenges in computer vision.

Conflict of interest

The author declare that they have no conflicts of interest related to this work.

Similarity rate (iThenticate): %11

References

[1] Y. Dong, C. Kang, J. Zhang, Z. Zhu, Y. Wang, Y. Xiao, H. Su, X. Wei, and J. Zhu, Benchmarking robustness of 3d object detection to common corruptions in autonomous driving, arXiv Preprint, 2023. https://doi.org/10.48550/arxiv.2303.11040.

[2] H. A. Akyürek, H. İ. Kozan, and Ş. Taşdemir, Surface crack detection in historical buildings with deep learning-based YOLO algorithms: a comparative study, Computational Research Progress in Applied Science & Engineering, 10, 3, 1-14, 2024. https://doi.org/10.61186/crpase.10.3.2904.

[3] M. Akgül, H. İ. Kozan, H. A. Akyürek, and Ş. Taşdemir, Automated stenosis detection in coronary artery disease using yolov9c: Enhanced efficiency and accuracy in real-time applications, Journal of Real-Time Image Processing, 21, 177, 2024. https://doi.org/10.1007/s11554-024-01558-x.

[4] H. A. Akyürek, Tıbbi Görüntülerde Yapay Zekâ Temelli Nesne Tespiti Uygulamaları, in Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliğinde İleri Araştırmalar, G. Kutluana Ed. Afyonkarahisar: YAZ Yayınları, 2024. https://doi.org/10.5281/zenodo.14604344.

[5] H. İ. Kozan and H. A. Akyürek, Efficient and rapid classification of various maize seeds using transfer learning and advanced AI techniques, ASEAN Journal of Scientific and Technological Reports, 28, 1, e255200, 2025. https://doi.org/10.55164/ajstr.v28i1.255200.

[6] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, You only look once: unified, real-time object detection, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, 779-788, 2016. https://doi.org/10.1109/cvpr.2016.91.

[7] R. Kishor, Performance benchmarking of YOLOv11 variants for real-time delivery vehicle detection: a study on accuracy, speed, and computational trade-offs, Asian Journal of Research in Computer Science, 17, 12, 108-122, 2024. https://doi.org/10.9734/ajrcos/2024/v17i12532.

[8] R. Khanam and M. Hussain, YOLOv11: an overview of the key architectural enhancements, arXiv Preprint, 2024. https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.17725.

[9] H. Hsiang, Development of an effective corruption-related scenario-based testing approach for robustness verification and enhancement of perception systems in autonomous driving, Sensors, 24, 1, 301, 2024. https://doi.org/10.3390/s24010301.

[10] C. Michaelis, B. Mitzkus, R. Geirhos, E. Rusak, O. Bringmann, A. S. Ecker, M. Bethge, and W. Brendel, Benchmarking robustness in object detection: autonomous driving when winter is coming, arXiv Preprint, 2020. https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.07484.

[11] G. S. Bennabhaktula, E. Alegre, N. Strisciuglio, and G. Azzopardi, PushPull-Net: inhibition-driven ResNet robust to image corruptions, in Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 2025, 15308 LNCS, 391-408, https://doi.org/10.1007/978-3-031-78186-5_26.

[12] T.-Y. Lin, M. Maire, S. Belongie, J. Hays, P. Perona, D. Ramanan, P. Dollár and C. L. Zitnick, Microsoft COCO: common objects in context, Cham, 2014: Springer International Publishing, in Computer Vision – ECCV 2014, 740-755. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10602-1_48.

[13] P. Varghese, Biologically inspired deep residual networks, Iaes International Journal of Artificial Intelligence (Ij-Ai), vol. 12, no. 4, p. 1873, 2023. https://doi.org/10.11591/ijai.v12.i4.pp1873-1882.

[14] R. Pogodin, Y. Mehta, T. P. Lillicrap, and P. E. Latham, Towards biologically plausible convolutional networks, 2021. https://doi.org/10.48550/arxiv.2106.13031.

[15] Y. Shen, J. Wang, and S. Navlakha, A correspondence between normalization strategies in artificial and biological neural networks, Neural Computation, 33 ,12 3179–3203, 2021. https://doi.org/10.1162/neco_a_01439.

[16] M. Zingerenko, Bipolar morphological YOLO network for object detection, Proceedings Volume 13072, Sixteenth International Conference on Machine Vision 130720Q, 2024. https://doi.org/10.1117/12.3023255.

[17] D. H. Hubel and T. N. Wiesel, Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex, The Journal of Physiology, 160, 1, 106, 1962. https://doi.org/10.1113/jphysiol.1962.sp006837.

[18] G. Azzopardi, A. Rodríguez-Sánchez, J. Piater, and N. Petkov, A push-pull CORF model of a simple cell with antiphase inhibition improves SNR and contour detection, PloS one, 9, 7, e98424, 2014. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0098424.

[19] L. J. Borg-Graham, C. Monier, and Y. Fregnac, Visual input evokes transient and strong shunting inhibition in visual cortical neurons, Nature, 393, 6683, 369-373, 1998. https://doi.org/10.1038/30735.

[20] D. H. Hubel and T. N. Wiesel, Brain mechanisms of vision, Scientific American, 241, 3, 150-163, 1979. https://doi.org/10.1038/scientificamerican0979-150.

[21] H. Zhang and Y. Wang, Towards adversarially robust object detection, 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, Seoul, Korea, pp. 421-430, 2019. https://doi.org/10.1109/iccv.2019.00051.

[22] R. Poojary, R. Raina, and A. K. Mondal, Effect of data-augmentation on fine-tuned cnn model performance, Iaes International Journal of Artificial Intelligence, 10, 84, 2021. https://doi.org/10.11591/ijai.v10.i1.pp84-92.

[23] P. Shah and M. El-Sharkawy, A-MnasNet: augmented MnasNet for computer vision, 2020 IEEE 63rd International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), pp. 1044-1047, Springfield, MA, USA, 2020. https://doi.org/10.1109/mwscas48704.2020.9184619.

[24] C. Shorten and T. M. Khoshgoftaar, A survey on image data augmentation for deep learning, Journal of Big Data, 6, 1, 2019. https://doi.org/10.1186/s40537-019-0197-0.

[25] Ultralytics. Ultralytics YOLO documentation. https://docs.ultralytics.com/models/yolo11/, Accessed 20 March 2025.

[26] Y. Luo, The evolution of YOLO: from YOLOv1 to YOLOv11 with a focus on YOLOv7's innovations in object detection, Theoretical and Natural Science, 87, 1, 82-90, 2025. https://doi.org/10.54254/2753-8818/2025.20335.

[27] E. H. Alkhammash, A comparative analysis of YOLOv9, YOLOv10, YOLOv11 for smoke and fire detection, Fire, 8, 1, 26, 2025. https://doi.org/10.3390/fire8010026.

[28] R. Bohush, S. Ablameyko, and Y. Adamovskiy, Robust object detection in images corrupted by impulse noise, Computer Modeling and Intelligent Systems, vol. 2608, pp. 1107-1116, 2020. https://doi.org/10.32782/cmis/2608-83.

[29] B. Jaison, G. Anjali Jha, J. Jeevitha, and C. Devi Priya, You only look once(YOLO) object detection with COCO using machine learning, in International Interdisciplinary Humanitarian Conference for Sustainability, IIHC 2022 - Proceedings, 2022. pp. 1574-1578, https://doi.org/10.1109/IIHC55949.2022.10059737.

[30] A. Borji, Complementary datasets to COCO for object detection, arXiv Preprint, 2022. https://doi.org/10.48550/arxiv.2206.11473.

[31] R. F. Woolson, Wilcoxon signed-rank test, Encyclopedia of Biostatistics, 8, 2005. https://doi.org/10.1002/0470011815.b2a15177.

[32] C. Lu, J. Wu, S. Ali, and M. L. Olsen, Assessing the uncertainty and robustness of object detection models for detecting stickers on laptops, arXiv Preprint, 2024. https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.03782.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 1116-1125
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences
Araştırma makalesi / Research article
www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Türkiye'nin araştırma ve geliştirme performansının ENTROPİ ve COPRAS yöntemi ile analizi: 2012-2023 yıllarının değerlendirmesi

Analysis of Türkiye's research and development performance using the ENTROPY and COPRAS methods: Evaluation of the years 2012-2023

Ali Sevinç[1,*]

[1] *KOSGEB, 06935, Ankara Türkiye*

Öz

Araştırma-Geliştirme (Ar-Ge) harcamalarına ayrılan pay ülkenin gelişmişliği ve kalkınmışlığının önemli bir ölçüsüdür. Türkiye'de Ar-Ge harcamalarının gayri safi milli hasılaya oranı son on yılda düzenli artış göstermiştir. Ülkenin beş yıllık kalkınma planında, teknoloji geliştirmek ve teknoloji seviyesini artırmak, uluslararası alanda rekabet edebilir seviyeyi yakalamak ve toplumun refah seviyesini yükseltmek için Ar-Ge harcamalarını, gayri safi milli hasılaya oranı artırmak için hedef belirlemiştir. Bu çalışmanın amacı: TÜİK verilerine göre, Türkiye'de yükseköğretim, devlet, mali ve mali olmayan şirketler tarafından yapılan Ar-Ge harcamaları, Ar-Ge harcamalarının gayri safi milli hasılaya oranı, Türk Patent ve Marka Kurumunun açıkladığı, faydalı model tescil sayısı ve patent tescil sayıları üzerinden COPRAS yöntemi ile analiz edip, Türkiye'nin 2012-2023 yılları arası Ar-Ge performansını değerlendirmektir. Çalışma sonucuna göre, ENTROPİ temelli COPRAS yöntemiyle, Ar-Ge performans sıralaması yapılmıştır. Türkiye'nin Ar-Ge performansı değerlendirmesine göre birinci sırada 2012 yılı yer almış, ikinci sırada 2013 yılı, üçüncü sırada 2014 ve son sırada 2023 yılı yer almıştır. Bu sıralama, Türkiye'nin Ar-Ge performansında istikrarlı bir artış olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Ar-Ge, Çok kriterli karar verme, ENTROPİ, COPRAS

Abstract

The share allocated to research and development (R&D) expenditures is an important measure of a country's development and progress. In Türkiye, the ratio of R&D expenditures to gross domestic product has shown a steady increase over the past decade. In the country's five-year development plan, the goal is to increase R&D expenditures as a percentage of gross domestic product to develop technology, raise the level of technology, achieve an internationally competitive level, and improve the welfare of society. The aim of this study: According to TURKSTAT data, the R&D expenditures of higher education, government, financial, and non-financial companies in Turkey, the ratio of R&D expenditures to gross national product; the number of utility model registrations; and the number of patent registrations announced by the Turkish Patent and Trademark Office are analyzed using the COPRAS method, and Turkey's R&D performance between 2012 and 2023 is evaluated. using the ENTROPY-based COPRAS method. According to the evaluation of Turkey's R&D performance, 2012 is ranked first, 2013 is ranked second, 2014 is ranked third, and 2023 is ranked last. This ranking shows a steady increase in Türkiye's R&D performance.

Keywords: R&D, MCDM, ENTROPY, COPRAS

1 Giriş

Ülkenin ekonomi birimlerinin başlıca sorumlulukları arasında ülke ekonomisinin büyümesi için planlama yapılması yer almaktadır. Bunun için Dünya ülkeleri ile rekabet edebilir seviyeyi yakalamak ve toplumun refah seviyesini artırmak için her yıl düzenli olarak belirlenen ekonomi büyüme hedeflerine ulaşmak amacıyla Araştırma ve Geliştirme (Ar-Ge) faaliyetleri teşvik edilmektedir. 2024-2028 yılları arası: on ikinci kalkınma planında, tarım, sanayi, teknoloji, enerji ve savunma sanayinde Ar-Ge faaliyetlerinin yapılması için yol haritası sunulmuştur. Ar-Ge harcamalarının gayri safi milli hasılaya oranı (%) 2022 yılında %1.40 ve 2023'de %1.55 gerçekleşmiştir. Bu kalkınma planında 2028 yılı için 2.05 olarak belirlenmiştir [1].

Ar-Ge faaliyetlerinin uzun vadede gayri safi yurtiçi hasılaya olumlu yansıdığı bilinmekte birlikte, yüksek teknoloji ürünleri ihracatının ülke ekonomisinin büyümesine ve kalkınmasına katkı verdiği bilinen bir durumdur [2], [3]. Japonya, Rusya, Güney Kore ve Çin gibi gelişmiş ülkelerin uluslararası piyasada rekabet gücünün artmasında, ekonomik alanlarda ilerlemesinde Ar-Ge yatırımlarının önemli rolü olmuştur [4]. Bununla birlikte, Türkiye'de Ar-Ge için yapılan harcamaların, ekonomik büyümeye, istihdama ve ürünlerin yerlileşmesine önemli katkısı olmuştur [5].

Bu çalışmanın amacı; Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından yayımlanan, yükseköğretim kurumları, devlet, mali ve mali olmayan şirketler tarafından yapılan Ar-Ge harcamaları ve Ar-Ge harcamalarının gayri safi yurt içi hasılaya oranı verileri ile [6]. Türk Patent ve Marka Kurumu

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: alisevinc71@gmail.com (A. Sevinç)
Geliş / Received: 13.02.2025 Kabul / Accepted: 25.06.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1639542

(TÜRKPATENT) tarafından yayımlanan faydalı model tescil sayısı ve patent tescil sayıları verilerinin, [7]. Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden COPRAS yöntemi ile analiz ederek, Türkiye'nin 2012-2023 yılları arasındaki Ar-Ge performansını değerlendirmektir. Son yıllarda Türkiye'nin Ar-Ge performansında istikrarlı bir artış veya dalgalı bir artış mı olduğunun anlaşılması sağlanacaktır. Dolayısıyla bu yönüyle literatüre özgün çalışma sunmak hedeflenmiştir.

Çalışma planı olarak; giriş bölümünden sonra, çalışmanın kavramsal çerçevesi ele alınacaktır. Takip eden bölümde literatür araştırmasına yer verilmekte, ardından kullanılan yöntemlerin detayları bulunmaktadır. Bulgular kısmında çalışmadan elde edilen bulgular yer almış, son bölümde ise sonuç, tartışma ve önerilere yer verilmektedir.

2 Kavramsal çerçeve

Ar-Ge faaliyetleri, yenilik yapmak için bilgi stokunda artış yoluyla teknolojik gelişmeleri sağlayan her türden yenilikçi ve sistematik bir aktivite olarak tanımlanabilir [8]. Başka bir ifadeyle Ar-Ge, bilgi birikimini artırmak amacıyla planlı olarak yürütülen faaliyet ve bu bilginin yeni faaliyetler için kullanılmasıdır. Bir başka tanıma göre ise Ar-Ge, eğitim ve bilimsel yenilikler kazandıracak yeni bilgileri sağlamak veya var olan bilgilerle yeni malzeme, ürün ve araçlar geliştirmek, bilgisel ve sistemli olarak yeni projeler hayata geçirmek, süreç ve hizmetler gerçekleştirmek veya hâlihazırda olanları ilerletmek amacı ile uygulanan sistematik aktivitelerdir [9].

1980'lerden itibaren, küresel ekonomideki yaşanan değişimler, yoğun bir rekabet ortamı oluşmasına neden olmuştur. Böylece teknoloji ve yeniliğin önemi artmıştır [10]. Teknolojik gelişmeler, kaynakların etkin kullanılmasını sağlamakla birlikte ülkelerin sanayileşmesine katkı vermektedir. Ayrıca, ekonomik büyümeyi destekler [11]. Yeni istihdam alanları sağlamakta, rekabet ortamının oluşmasına ve verimliliğin artışına destek vermektedir. Bununla birlikte, sosyo-ekonomik gelişmelere ön ayak olmaktadır [9]. Yaşanan bu gelişmeler, ülkelerin güçlü ve sağlıklı ekonomiye ulaşmasına ve diğer ülkeler karşısındaki rekabet gücünün artışına katkı sağlar [8].

Ar-Ge faaliyetleri, yeni ürün ve hizmetlerin gelişmesini tetikler, yeni müşteri ve pazar alanları oluşmasını sağlar. Bu yolla firmalar gelirlerini artırır. İstihdam artışına katkı verir, işsizliğin artışına engel olur. Piyasada daha nitelikli iş gücünün artışına vesile olur. Öte yandan, ekonomideki sektörlerin yapısını değiştirebilir. Ar-Ge, eğitim ve yetenek gelişimi için yatırım yapılmasını teşvik eder. Böylece ülke ekonomisinin büyümesine katkı sağlar [5].

Ar-Ge faaliyetleri için yapılan harcamaların, iktisadi büyüme ve işsizlik değişkenleri üzerinde etkisi olmaktadır. Yenilikçi faaliyetler sonucu ortaya çıkan ürün ve hizmetlerin, iktisadi dinamikleri nasıl etkilediğini anlamamızı sağlar. Ar-Ge harcamaları, yeniliklerin ve teknolojik ilerlemeler ile bilgi birikiminin kaynağı olarak üretim süreçlerinde ve ürünlerde performans artışı sağlar. Bunlara ilaveten, daha verimli etkin üretim yöntemleri, daha yüksek çıktı sağlar ve ürün maliyetlerini düşürür. Özellikle ekonominin genel üretkenliğini artırır. Ar-Ge, yeni ürünlerin ve hizmetlerin geliştirilmesine olanak tanıyarak yeni pazarların ve tüketici talebinin oluşmasını tetikler, piyasalara hareketlilik kazandırır [8].

Ar-Ge harcamaları yapan firmaların bilanço değerlerinde artış yaşanır. Firmaların karlılıklarına ve dolayısıyla hisse değer artışı meydana gelir [12]. Ar-Ge faaliyetleri, yüksek teknoloji ve çok yüksek karlı ürünlerin üretimine imkân sağlayarak, ülke ekonomisine katkı vermektedir [13]. Ar-Ge çalışmaları yeni üretim tekniklerinin geliştirilmesi ve bunun teknolojiye uyarlanmasını sağlar [14]. Ayrıca, Ar-Ge için yapılan harcamalar, bilgi ve teknoloji tabanlı bir ekosistem kurulmasına öncülük eder [15].

Ar-Ge yatırımlarının yeni ürün ve hizmetlere dönüşümü ve dolayısıyla patent başvurularına yansımasının anlamlı olduğu açıktır [16]. Patent başvuru sayısı, Ar-Ge ile ilgili yapılan faaliyetlerin yeni ürün ve hizmete dönüştüğü gösteren önemli göstergedir [17]. Patent hakkı yenilikçi ürün, geliştiren kişi ve firmaların mülkiyet hakkını, başka kişi ve kurumlara karşı korur [18]. Patent hakkının korunması yabancı yatırımların artmasına katkı sağlar [19].

Araştırmalarda, Ar-Ge harcamalarındaki artışın, patent başvuru sayısının artışına neden olduğu ifade edilmiştir [16], [17]. Bu nedenle, firmalar, rekabet gücünü artırabilmek amacıyla yenilikçi ürün ve hizmetler geliştirerek, patentli ürün sahibi olabilmek için Ar-Ge çalışmaları yapmaktadır [20]. Buna benzer hedeflerine ulaşmak için kurum ve kuruluşlar Ar-Ge çalışmalarına harcama yapmaktadır [21]. Ar-Ge harcamalarının diğer bir katkısı ise bilimsel makale sayısının artışına yansır [19].

TÜİK kayıtlarına göre, Türkiye'de 2012-2023 yılları arası Ar-Ge Harcamalarının gayri safi milli hasıla içindeki payı (%) Tablo 1'de verilmiştir [6]. Ar-Ge harcamalarının gayri safi milli hâsıla içinde payının her yıl düzenli arttığı görülmektedir.

Tablo 1. Ar-Ge harcamalarının Gayri Safi Milli Hasılaya oranı

Yıl	Gayri Safi Milli Hasılaya Oranı
2012	0.83
2013	0.81
2014	0.86
2015	0.97
2016	1.12
2017	1.18
2018	1.27
2019	1.32
2020	1.37
2021	1.40
2022	1.32
2023	1.42

Kaynak: TÜİK

3 Literatür araştırması

İsviçre Borsası'ndaki ilaç şirketlerinin Fuzzy DEA, Fuzzy ANP, DEMATEL yöntemleri ile performansı değerlendirilmiştir [22]. Türkiye'de İBBS Düzey 1'deki bölgelerin inovasyon performansı DEMATEL ve TOPSIS yöntemleri değerlendirilmiştir [23]. Wartsila balıkçı gemisi projesi için belirlenen 12 kritere göre en uygun makineyi seçmek için AHP, TOPSIS ve PROMETHEE yöntemleriyle elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve en uygun yöntem belirlenmiştir [24]. Araştırma ve teknoloji organizasyonlarının performans değerlendirmesi, BSC, DEMATEL, ANP, ARAS, COPRAS, MOORA, TOPSIS yöntemleri ile yapmışlardır [25]. İşletmelerin inovasyon faaliyetlerine etki eden parametreler belirlenip önceliklendirilmiştir. Çalışan özellikleri, işletmelerin inovasyon faaliyetlerine etki eden en önemli ana parametre olarak belirlenmiş, alt parametreler arasında deneyim, eğitim düzeyi ve çalışan sayısı AHP yöntemi ile ağırlıklandırılmıştır [26]. Türkiye'de bölgeler ve iller düzeyinde Ar-Ge ve inovasyon performansı Gri İlişkisel Analiz yöntemi ile değerlendirilmiştir [27]. ENTROPİ ve MABAC yöntemleri bütünleşik olarak kullanılarak ülkelerin inovasyon performansı ölçülmüştür. İnovasyon performansı en yüksek olan ülkelerin İsviçre, İsveç ve Danimarka, en düşük olan ülkeler ise Ukrayna, Romanya ve Makedonya olduğu tespit edilmiştir [8]. Avrupa Birliği ve Türkiye'nin inovasyon performans analizi TOPSIS ve MOORA yöntemi ile yapılmıştır. İlk üç sırada İsviçre, İsveç, Danimarka yer alırken, Türkiye TOPSİS yöntemine göre 31. sırada MOORA yöntemine göre 33. sırada yer almıştır [28]. G7 ülkeleri inovasyon performansının karşılaştırılmasını ENTROPİ ve Gri İlişkisel analiz yöntemleri ile yapılmıştır [29]. Türkiye'deki illerin Ar-Ge ve inovasyon performansı ENTROPİ ve PROMETHEE yöntemi ile değerlendirilmiştir. 81 il için Ar-Ge ve inovasyon performans endeksi oluşturulmuştur [30]. Türkiye bölgesel seviyede inovasyon etkinliğinin tespiti ve etkin bölgelerin performans sıralaması VZA yöntemi ile yapılmıştır. On adet bölgenin yenilik açısından başarılı olduğu belirlenmiştir [31]. Türk Devletleri Teşkilatına üye ülkelerinin inovasyon performansı ENTROPİ ve TOPSIS yöntemi ile değerlendirilmiştir. Türkiye birinci sırada yer almıştır [32]. BRICS-T ülkelerinin inovasyon performansı MEREC ve MARCOS yöntemi ile değerlendirilmesi yapılmıştır. Çin ve Hindistan en yüksek performansa sahip, Türkiye ise üçüncü sırada yer almıştır [33]. OECD ülkelerinin rekabet ve inovasyon performans değerlendirmesi EDAS yöntemi ile yapılmıştır. Japonya en yüksek performansa sahip olurken, ABD ve Güney Kore takip etmiştir [34]. KOSGEB Ar-Ge destek programının değerlendirilmesi yapılmıştır. 2022 yılı en faydalı yıl olarak belirlenmiştir [13]. Ülkelerin yükseköğretim Ar-Ge verimliliği VZA yöntemi ile karşılaştırılması yapılmıştır. Bulgaristan, Çin, Romanya ve Slovenya'nın her iki VZA modelinde verimli olduğu değerlendirilmiştir [35].

Yapılan literatür incelemesinde, Türkiye'de 2012-2023 yılları arası Ar-Ge harcamalarının gayri safi milli hasılaya oranı, toplam Ar-Ge harcamaları, Ar-Ge faaliyetlerinde çalışan sayısı, patent tescil sayısı ve faydalı model tescil sayıları üzerinden Türkiye'nin Ar-Ge performansını, ENTROPİ tabanlı COPRAS yöntemiyle değerlendirmeye yönelik çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu nedenle, bu çalışmanın literatüre katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

4 Yöntem

Bu çalışmada, ÇKKV yöntemlerinden ENTROPİ ve COPRAS yöntemleri kullanılmaktadır. Çalışmada kullanılan kriterler TÜİK web sayfasından temin edilmiştir. Dolayısıyla objektif verilerdir. Bu nedenle ağırlıklandırma işleminde ENTROPİ yöntemi kullanılmıştır. 2012-2023 yılları arası Ar-Ge performans değerlendirmesi için yapılan sıralama işleminde COPRAS yöntemi tercih edilmiştir. İlk önce ağırlıklandırma ve daha sonra sıralama işlemi yapılmaktadır. Her iki yöntem birbirini tamamlayan yöntemlerdir.

4.1 ENTROPİ yöntemi

ENTROPİ kavramı, evrende kendi haline bırakılan tüm sistemlerin zaman içerisinde düzensizliğe uğraması ve sonunda bozulması olarak tanımlanmıştır. Daha sonra Shannon bu kavramı, kesikli olasılık dağılımı ile açıklanmış ve belirsizliğin bir ölçüsü olarak açıklanmıştır. ENTROPİ yöntemi ÇKKV problemlerinde kriter ağırlıklarının hesaplanmasında kullanılan nesnel bir yöntemdir. Bu yöntemde subjektif değerlendirmeye ihtiyaç duymadan, objektif verilere göre hesaplamalar yapılır. Subjektif değerlendirmeye ihtiyaç duyulmaması nedeniyle literatürde yer alan çalışmalarda sıklıkla kullanılmaktadır [36].

ENTROPİ yöntemi işlem adımları [37],[38].

Adım 1-Karar Matrisinin Oluşturulması

n adet karar alternatifi ve m adet değerlendirme kriteri içeren karar matrisi Denklem (1)'de gösterildiği biçimde oluşturulur.

$$X = \begin{matrix} x_{11} & x_{12} & \ldots\ldots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \ldots\ldots & x_{2n} \\ \ldots. & \ldots & \ldots\ldots & \ldots. \\ x_{i1}. & x_{i2} & \ldots\ldots & x_{in} \\ \ldots. & \ldots\ldots & \ldots. & \ldots\ldots \\ x_{m1} & x_{m2} & \ldots\ldots & x_{mn} \end{matrix} \quad (1)$$

Adım 2-Karar Matrisinin Normalize Edilmesi

Normalize edilen karar matrisinin oluşturulması. Fayda ve maliyet indeksine göre kriterler Denklem (2) ve (3) kullanılarak normalize matris oluşturulur

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{max x_{ij}} \quad i = 1,2,3,\ldots.,m \ ve \ j = 1,2,3,\ldots.,n \quad (2)$$

$$r_{ij} = \frac{min x_{ij}}{x_{ij}} \quad i = 1,2,3,\ldots.,m \ ve \ j = 1,2,3,\ldots.,n \quad (3)$$

Adım 3-Kriterlere İlişkin ENTROPİ Değerlerinin Hesaplanması

ENTROPİ değerleri Denklem (4) kullanılarak hesaplanır.

$$E_j - k \sum_{i=1}^{m} (x_{ij}^* \ ln x_{ij}^* \quad (4)$$

Adım 4- Bilginin Farklılaşması Derecesinin Hesaplanması

Bilginin farklılaşması Derecesi Denklem (5) göre hesaplanır

$$d_j = 1 - e_{J,\ \forall J}\ , i\ = 1,2,3,\ldots.,m\ ve\ j\ = 1,2,3,.,n \quad (5)$$

5- Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması

ENTROPİ ağırlığı eldeki yararlı bilginin derecesini gösterir. Bunun diğer anlamı hesaplanan ENTROPİ ağırlığı belirlenen kriterin önem derecesini gösterir. Denklem (6) kullanılarak hesaplanır.

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^{n} d_j} \quad (6)$$

Eşitlikte w_j değeri kriterlerin önem düzeylerinin göstergesi olan ağırlık değerlerini ifade etmektedir. ENTROPİ olasılık toplam değeri 1 dir.

4.2 COPRAS yöntemi

COPRAS yöntemi, 1996 yılında Zavadskas ve Kaklauskas tarafından geliştirilmiştir. Türkçe'de karşılığı "Karmaşık Oransal Değerlendirme" olan Complex Proportional Assessment (COPRAS), hem nitel hem de nicel faktörleri analiz eden bir ÇKKV yöntemidir. Bu yöntem, ölçütlerin maksimizasyon ve minimizasyon yönlerini içeren alternatiflerin sıralanması ve değerlendirilmesine uygun olan bir yöntemdir [39].

AHP ve TOPSIS gibi diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında, diğer yöntemlere göre çok daha az hesaplama gerektirdiğinden COPRAS yönteminin kullanımı çok kolaydır. COPRAS yöntemi hem maksimize edici hem de minimize edici kriterleri hesaplama yeteneğine sahiptir. Bu yöntem hem niteliksel hem de niceliksel kriterleri hesaplamayı geliştirir. COPRAS yönteminin diğer ÇKKV yöntemlerine kıyasla temel avantajı fayda derecesini gösterebilmesidir. Alternatifler karşılaştırıldığında, hangisinin daha iyi veya daha kötü olduğu gösterilebilir [40].

SAW (Simple Additive Weighting) gibi bazı ÇKKV yöntemler negatif değerlerin değerlendirmesi için dönüşüm gerektirmektedir. Bu işlem, karar verici için zaman almakta ve karmaşık durum oluşturmaktadır. Buna benzer nedenler diğer yöntemleri tercih edilmemesinde etkin rol oynamıştır. AHP, VIKOR ve TOPSIS gibi diğer ÇKKV yöntemlerine kıyasla daha basit, kullanımı kolay ve hesaplama süresi daha kısa olan bir yöntemdir. COPRAS yöntemi diğer ÇKKV yöntemlerinden ayrılan en önemli özelliği; karar seçeneklerini birbirleriyle karşılaştırarak alternatiflerin ne kadar iyi veya kötü olduğunu yüzde cinsinden ortaya koymasıdır. Karar seçeneklerini performanslarına göre azalan sırada sıralama imkânı sunar. İki karşılaştırma yapılması sayesinde, alternatif sayısından bağımsız olarak işlem süreci diğer ÇKKV yöntemlerine göre daha kısa ve pratiktir. COPRAS yönteminin performans değerlendirmeye uygun olması, maksimizasyon ve minimizasyon boyutunun bulunması gibi nedenlerden dolayı COPRAS yöntemi tercih edilmiştir [39].

COPRAS yöntemi yedi adımdan oluşmaktadır [40-42].

Adım 1: Karar Matrisinin Oluşturulması

Karar matrisi (X), sürecin başlangıcında karar vericiler tarafından oluşturulan bir matristir. Bu matrisin satırlarında sıralanmak istenen karar seçenekleri, sütunlarında ise ölçüt olarak adlandırılan değerlendirme faktörleri yer alır. Denklem (7) da verilmektedir.

$$X_{ij} = \begin{matrix} x_{11} & x_{12} & \ldots. & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \ldots. & x_{2n} \\ \ldots. & \ldots & \ldots\ldots & \ldots. \\ x_{i1}. & x_{i2} & \ldots. & x_{in} \\ \ldots. & \ldots. & \ldots. & \ldots. \\ x_{m1} & x_{m2} & \ldots. & x_{mn} \end{matrix} \quad (7)$$

2. Adım Karar Verme Matrisi Denklem (8) göre Normalleştirilmesi yapılmaktadır.

$$X_{IJ}^{*} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}} \quad \forall j = 1,2,\ldots\ldots,n \quad (8)$$

3- Ağırlıklı Normalize Karar Verme Matrisinin Belirlenmesi

$$r_{ij} = x_{ij}^{*} * w_j \quad (9)$$

Denklem (9) göre normalize karar matrisi kriterle verilen ağılıklarla çarpılır ve ağırlıklı normalize karar matrisi oluşturulur.

4-Her Biri için Maksimize ve Minimize Edici Endeksin Hesaplanması

Alternatif ağırlıklı normalize edilmiş karar matrisinden, Denklem (10)'te verilen faydalı kriter değerlerinin toplamı ve Denklem (11)'te verilen faydasız kriter değerlerinin toplamı bulunur.

$$S_{\text{İ}}^{+} = \sum_{j=1}^{k} r_{ij,}\ \ i = 1,2,\ldots\ldots,k \quad (10)$$

$$S_{\text{İ}}^{-} = \sum_{j=k+1}^{k} r_{ij,}\ i = k+1,k+2,\ldots\ldots,n \quad (11)$$

5-Her Bir Alternatifin Göreceli Ağırlığının Hesaplanması

Denklem (12) göre hesaplanır

$$Q_i = S_{\text{İ}}^{+} + \frac{\sum_{i=1}^{m} S_i^{-}}{S_i^{-} \sum_{i=1}^{m} \frac{1}{S_i^{-}}} \quad i = 1,2,\ldots\ldots,m \quad (12)$$

6-Alternatiflerin Öncelik Sırasının Belirlenmesi

$$Q_{max} = \{Q_{\text{İ}}\}\ \forall i = 1,2,\ldots\ldots,m \quad (13)$$

Denklem (13) göre en büyük göreceli önem değeri bulunur.

7-Her bir alternatif için Performans Endeksi (Pi) Değerinin Hesaplanması

$$P_{\text{İ}} = \frac{Q_i}{Q_{max}} * 100\%,\ \ i = 1,2,\ldots\ldots m \quad (14)$$

Her bir alternatif performans indeksi P_i değerleri Denklem (14) gibi yapılır.

P_i Performans indeks, büyükten küçüğe sıralanarak alternatiflerin tercih sırlaması elde edilir. Performans indeksi 100 olan alternatif, en iyi alternatifi temsil eder.

5 Veri toplama araçları

Bu çalışmada, Ar-Ge harcamalarının, gayrisafi milli hasılaya yurtiçi oranı, Ar-Ge harcamaları (TL), Ar-Ge çalışan sayısı, TÜİK web sayfasından, faydalı model tescil sayısı ve patent tescil sayısı adlı değişkeneler ise TÜRKPATENT kurumu web sayfasından temin edilmiştir [6], [7].

Bu çalışmada kullanılan kriter adları literatürde yer almaktadır. Bu kriterler, Gayri safi yurtiçi hasıla, Ar-Ge harcamaları, patent sayıları, Ar-Ge insan kaynağı, Ar-Ge harcamaları, faydalı model tescil sayıları ve brüt Ar-Ge harcamalarının gayri safi yurtiçi hasıla, içindeki payından (%) oluşmaktadır. Kriterler listesi Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Kriterler listesi

Değişken Adı	Kaynak
Patent Sayıları	[43].
Ar-Ge Çalışanı	[44].
Ar-Ge Harcamaları	[45], [9].
Faydalı Model Tescil Sayıları	[46].
Ar-Ge Harcamalarının Gayri Safi Yurtiçi Hâsıla İçindeki Payı	[14].

6 Bulgular

Ağırlıklandırma işlemi için ENTROPİ yöntemi tercih edilmiştir. ENTROPİ yöntemi karar vericinin yargısına göre değil, nesnel verilere göre hesaplama yapar. Bu çalışmadaki verilerin nesnel olması nedeniyle ağırlıklandırma işleminde ENTROPİ yöntemi kullanılmıştır.

Türkiye'de Ar-Ge harcamaları, Ar-Ge çalışmasındaki çalışan sayısı, Ar-Ge harcamalarının gayrisafi milli hasıla içindeki oranı, faydalı model tescil sayısı ve patent tescil sayısı verilerinden oluşmaktadır. Karar matrisi Tablo 3'te verilmiştir.

Karar matrisi normalize edilmiş, Tablo 4'te verilmiştir.

ENTROPİ yöntemine göre hesaplamalar Excelde yapılmıştır. Ağırlıklandırma değerleri Tablo 5' de verilmiştir. ENTROPİ yöntemi ÇKKV problemlerinde belirsizliklere çözüm getirmek amacıyla kriter ağırlıklandırmaları nesnel bir şekilde ölçer. Veriler normalize edilmiş ve her kriterin ENTROPİ değeri hesaplanmıştır. ENTROPİ belirsizlik derecesini ölçer. Bu nedenle daha az belirsizlik içeren, daha fazla bilgi veren kriterler daha fazla önemli olduğu söylenebilir. Başka bir ifadeyle, ENTROPİ yöntemi kriter ağırlıklarının alternatifler arasında ayırt edici özelliğini hesaplar. Kriterler arasında ağırlık eşitse veya çok yakınsa belirsizlik fazla olduğu anlamına gelmektedir. Eğer kriterlerin ağırlıklıları arasında fark fazla olursa ayırt edicilik fazla olur.

Tablo 3. Karar matrisi

Yıl	Gayrisafi Yurtiçi Ar-Ge Harcaması (%)	Toplam Ar-Ge Harcaması (TL)	Ar-Ge İnsan Kaynağı (Sayı)	Faydalı Model Tescil Sayısı	Patent Tescil Sayısı
2012	0.83	1 3062 263 394	184301	2299	7816
2013	0.81	14 807 321 926	196321	2037	8925
2014	0.86	17 598 117 442	213686	2551	8530
2015	0.97	22 741 100 883	224284	2767	10100
2016	1.12	29 411 867 411	242213	2441	11074
2017	1.18	36 862 357 978	266478	2088	12424
2018	1.27	47 801 863 438	289791	335	13882
2019	1.32	56 977 709 236	305811	690	13720
2020	1.37	69 038 125 507	321392	1179	13017
2021	1.4	101 737 887 655	358289	2591	12566
2022	1.32	198 669 743 783	378157	2369	10335
2023	1.42	377 542 284 087	397167	1655	9934

Tablo 4. Normalize karar matrisi

Yıl	Ar-Ge Harcamaların ın Gayri Safi Yurtiçi Hâsıla İçindeki Payı (%)	Toplam Ar-Ge Harcaması (TL)	Ar-Ge İnsan Kaynağı (Sayı)	Faydalı Model Tescil Sayısı	Patent Tescil Sayısı
2012	0.0598	0.0132	0.0546	0.0999	0.0591
2013	0.0584	0.0150	0.0581	0.0886	0.0674
2014	0.0620	0.0178	0.0633	0.1109	0.0645
2015	0.0699	0.0231	0.0664	0.1203	0.0763
2016	0.0807	0.0298	0.0717	0.1061	0.0837
2017	0.0851	0.0374	0.0789	0.0908	0.0939
2018	0.0916	0.0485	0.0858	0.0146	0.1049
2019	0.0952	0.0578	0.0905	0.0300	0.1037
2020	0.0988	0.0700	0.0951	0.0513	0.0984
2021	0.1009	0.1032	0.1061	0.1126	0.0950
2022	0.0952	0.2014	0.1120	0.1030	0.0781
2023	0.1024	0.3828	0.1176	0.0720	0.0751

Ar-Ge harcamaları kriter ağırlığı 0,7737 dir. Faydalı model tescil sayısı kriter ağırlığı 0,1351 dir. Patent tescil sayısı kriter değeri 0,0228, Ar-Ge çalışan sayısı kriter ağırlığı 0,0418 ve Gayri safi yurtiçi hasıla oranına Ar-Ge harcaması ağırlığı ise 0,0267 dir. Toplam ağırlık 1'e eşittir. Ar-Ge harcamalarının kriter ağırlığı, diğer kriter ağılıkları arasındaki fark belirgin bir şekilde yüksektir. Patent tescil sayısı, Ar-Ge çalışan sayısı ve gayri safi yurtiçi hasıla oranına Ar-Ge harcaması ağırlığı toplamının düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan kriter ağırlıklarının alternatifler arasında ayırt edici özelliği bulunduğunu söylemek mümkündür.

Tablo 5. Kriterlere ilişkin ENTROPİ değerleri

Yıl	Ar-Ge Harcamalarının Gayri Safi Yurtiçi Hâsıla İçindeki Payı (%)	Toplam Ar-Ge Harcaması (TL)	Ar-Ge çalışan (Sayı)	Faydalı Model Tescil Sayısı	Patent Tescil Sayısı
2012	-0.1685	-0.0573	-0.1587	-0.2302	-0.1671
2013	-0.1659	-0.0630	-0.1654	-0.2147	-0.1819
2014	-0.1724	-0.0718	-0.1746	-0.2439	-0.1767
2015	-0.1860	-0.0869	-0.1801	-0.2548	-0.1964
2016	-0.2032	-0.1047	-0.1890	-0.2380	-0.2076
2017	-0.2096	-0.1228	-0.2004	-0.2178	-0.2221
2018	-0.2189	-0.1467	-0.2107	-0.0616	-0.2365
2019	-0.2238	-0.1647	-0.2175	-0.1052	-0.2350
2020	-0.2287	-0.1861	-0.2238	-0.1523	-0.2281
2021	-0.2315	-0.2343	-0.2380	-0.2460	-0.2236
2022	-0.2238	-0.3228	-0.2451	-0.2341	-0.1991
2023	-0.2333	-0.3676	-0.2517	-0.1894	-0.1944
ln (m)	0.4024				
ej	0.9923	0.7762	0.9879	0.9609	0.9934
dj	0.0077	0.2238	0.0121	0.0391	0.0066
wj	0.0267	0.7737	0.0418	0.1351	0.0228

6.1 COPRAS yöntemi hesaplamaları

Karar matrisi, 2012- 2023 yılları arasında Ar-Ge faaliyetleri için yapılan harcamalar ve bu yıllar arasındaki Ar-Ge çalışmalarında çalışan sayısı, faydalı model tescil sayısı, patent tescil sayısı ve Ar-Ge harcamalarının gayri safi mili hasılaya oranı kriterlerinden oluşmaktadır. COPRAS yöntemi hem maliyet hemde fayda kriterini aynı anda işlemeye uygun bir yöntemdir. Bu kriterleri, ENTROPİ yöntemi ile entegre etmeye uygun bir yöntemdir. ENTROPİ yöntemi ile yapılan ağırlık oranları matris tablosunda yer verilmiştir. Ar-Ge harcamaları, Ar-Ge çalışan sayısı ve Ar-Ge harcamaları gayri safi milli hasılaya oranı kriterleri maliyet olarak değerlendirilmiştir. Patent tescil sayısı ve faydalı model tescil sayısı kriterleri fayda olarak yorumlanmıştır. Karar matrisi Tablo 6 'da verilmiştir.

Tablo 6'da deki karar matrisinin normalize ve ağırlıklandırma işlemi yapılmış, Tablo 7. de verilmiştir.

Tablo 6. Ar-Ge performans değerlendirmesi karar matrisi

Yıl	Ar-Ge Harcamalarının Gayri Safi Yurtiçi Hâsıla İçindeki Payı (%)	Toplam Ar-Ge Harcaması (TL)	Ar-Ge İnsan Kaynağı (Sayı)	Faydalı Model Tescil Sayısı	Patent Tescil Sayısı
W_i	**0.0267**	**0.7737**	**0.0418**	**0.1351**	**0.0228**
YÖN	**Maliyet**	**Maliyet**	**Maliyet**	**Fayda**	**Fayda**
2012	0.83	13062263.394	184 301	2299	7816
2013	0.81	14807321.926	196 321	2037	8925
2014	0.86	17598117.442	213 686	2551	8530
2015	0.97	22741100.883	224 284	2767	10100
2016	1.12	29411867.411	242 213	2441	11074
2017	1.18	36862357.978	266 478	2088	12424
2018	1.27	47801863.438	289 791	335	13882
2019	1.32	56977709.236	305 811	690	13720
2020	1.37	69038125.507	321 392	1179	13017
2021	1.4	101737887.65500	358 289	2591	12566
2022	1.32	198669743.783	378 157	2369	10335
2023	1.42	377542284.0870	397 167	1655	9934

Tablo 7. Normalize ve ağırlıklandırılmış matris

Yıl	Ar-Ge Harcamalarının Gayri Safi Yurtiçi Hâsıla İçindeki Payı (%)	Toplam Ar-Ge Harcaması (TL)	Ar-Ge İnsan Kaynağı Sayısı	Faydalı Model Tescil Sayısı	Patent Tescil Sayısı
2012	0.001596	0.0102471	0.002282	0.0134	0.0013
2013	0.001557	0.0116161	0.002431	0.0119	0.0015
2014	0.001653	0.0138054	0.002645	0.0149	0.0014
2015	0.001865	0.0178400	0.002777	0.0162	0.0017
2016	0.002153	0.0230732	0.002999	0.0143	0.0019
2017	0.002268	0.0289180	0.003299	0.0122	0.0021
2018	0.002441	0.0374999	0.003588	0.0019	0.0023
2019	0.002537	0.0446982	0.003786	0.0040	0.0023
2020	0.002634	0.0541594	0.003979	0.0069	0.0022
2021	0.002691	0.0798120	0.004436	0.0152	0.0021
2022	0.002537	0.1558537	0.004682	0.0139	0.0017
2023	0.00273	0.2961768	0.004917	0.0097	0.0017

Tablo 8. Performans değerlerinin sıralanması

Yıl	S_{+1}	S_{-1}	S_{-min}	S_{-i-Top}	$\frac{S_{-min}}{S_{-i}}$	$\frac{S_{-min}}{S_{-i}}$ Top	Q_i	N_i	Sıra
2012	0.014843	0.014124381	0.01412	0.84218	1	5.35292	0.17217	1	1
2013	0.013496	0.015603721			0.90519		0.15591	0.905539	2
2014	0.016446	0.018104161			0.78017		0.13919	0.808432	3
2015	0.017984	0.022481423			0.62826		0.11683	0.678558	4
2016	0.016237	0.028224862			0.50042		0.09496	0.551589	5
2017	0.014397	0.034485418			0.40957		0.07883	0.457884	6
2018	0.004355	0.043528943			0.32448		0.05540	0.321801	7
2019	0.006411	0.051021718			0.27683		0.04996	0.290202	8
2020	0.009162	0.060771966			0.23241		0.04572	0.26559	9
2021	0.017375	0.086938957			0.16246		0.04293	0.24937	10
2022	0.015687	0.163072891			0.08661		0.02931	0.170261	11
2023	0.011426	0.303823592			0.04648		0.01874	0.108845	12

Türkiye'nin Ar-Ge performansının COPRAS yöntemiyle değerlendirilmesi yapılmıştır. Karar matrisi için normalize ve ağırlıklandırılmış matris oluşturulmuştur. Her bir alternatif için fayda kriterlerinden elde edilen toplam puan (S^+) ve maliyet kriterlerinden elde edilen toplam puan (S^-) hesaplanmıştır. Ardından, performans değerlendirilmesi için yılların sıralamasını yapmak üzere Q değeri hesaplanmış ve sıralamayı daha anlaşılır hale getirmek için de N_i değeri hesaplanmıştır. Bu değer, her bir alternatifin göreli üstünlüğünü gösterir. N_i, her alternatifin en iyi alternatife göre göreli üstünlüğünü (% olarak) gösterir. En yüksek skor, en iyi alternatif olarak belirlenir. Diğer alternatifler ise bu skora göre sıralanır. Karar vericiye "En iyinin yüzde kaç gerisinde veya yakınında?" bilgisini verir. Çalışmada elde edilen sonuca göre birinci sıradaki 1.00 değeri, ikinci sıradaki değer 0.9055, birinciye göre düşüktür. Üçüncü sıradaki skor ikinci sıradaki 0,8084 değerden düşüktür. En yüksek değerden en düşük değere doğru sıralama yapılmıştır. Skor değeri yüksek olan yıl, skor değeri düşük olan yıldan, performansı daha yüksek yıl olarak değerlendirilmektedir.

Performans değerlerinin sıralaması Tablo 8'de verilmiştir. Birinci sırada 2012 yılı, ikinci sırada 2013 yılı, üçüncü sırada 2014 yılı, 4.sırada 2015 yılı yer almıştır. Sırasıyla, 5. sırada 2016 yılı, 6. sırada 2017 yılı, 7.sırada 2018 yılı, 8. sırada 2019 yılı, 9. sırada 2020 yılı, 10.sırada 2021 yılı, 11 sırada 2022 yılı ve son olarak 12. sırada 2023 yılı yer almıştır.

COPRAS yöntemine göre sıralamada, harcamalardan kaynaklı maliyetlerde sürekli artış olduğu görülmektedir. Buna karşılılık faydalı model ve patent tescil sayısında zaman zaman artış olmasına rağmen, sürekli bir artış olmadığı görülmektedir. 2012 ile 2023 arasında fazla fark olduğu anlaşılmaktadır. Buna rağmen fayda ölçütleri de önceki yıllarda daha iyi durumda olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla maliyetlerin minimize edilip faydanın maksimize edilmesinden dolayı sıralama bu şekilde gerçekleşmiştir. Maliyet ölçütlerinin belirleyici olduğu anlaşılmaktadır.

7 Sonuç, tartışma ve öneriler

Ar-Ge harcamalarının ülke ekonomisi için tartışmasız büyük önemi bulunmaktadır. Bu harcamaların, yüksek teknoloji ürünlerin hayata geçirilmesinde etkisi büyüktür. Bu durum, ülkelerin rekabet gücüne olumlu yansımaktadır. Ar-Ge'ye yönelik yapılan çalışmalar, verimlilik artışını desteklemekte, yeni pazarlar erişimine önayak olmaktadır. Ayrıca, yeni istidam kapılarının açılmasına katkı vermektedir.

Ülke ekonomisi yönetiminde söz sahibi olanlar ve karar vericiler, Ar-Ge faaliyetlerinin ve harcamalarının önemini fark etmiş, ülkenin sanayileşmesi ve uluslararası rekabet gücünü artırmak amacıyla, Türkiye'nin beş yıllık kalkınma planlarında Ar-Ge ile ilgili faaliyetlere geniş yer vermiştir. Ar-Ge çalışmaları, ülkenin gelişme ve kalkınma stratejisi olmuştur. Beş yıllık kalkınma planında, Ar-Ge harcamalarının gayri safi milli hasıla oranına artırmak amacıyla, Ar-Ge hedefi ile ilgili rakamlar güncellenmiştir.

2012 -2023 yılları arası Ar-Ge harcamalarının gayri safi milli hasılaya oranında artış sağlanmıştır. 2012 yılında 0,83 iken 2023 de 1,42'e yükselmiştir. Ar-Ge harcamaları gayri safi milli hasılaya oranı 2012 yılından 2023 yılına kadar oranı % 71 artmıştır. Bu olumlu bir gelişmedir. Ama patent ve faydalı model tescil sayısında, düzenli bir artış olmamıştır. Bu harcamaların ve yatırımların çıktısının fazla olması için çalışmalar yapılmasında yarar görülmektedir.

Türkiye'de 2012-2023 yılları arası Ar-Ge harcamaları, Ar-Ge faaliyetlerinde çalışan sayısı çalışan patent tescil sayısı ve faydalı model tescil sayılarının analizi sonucu, 2012-2023 yıllarının COPRAS yöntemi ile sıralaması yapılarak, Türkiye'nin Ar-Ge performansı değerlendirmesine göre sıralamada ilk yıl 2012 yer almıştır.

İkinci yıl 2013, üçüncü yıl 2014, son yıl ise 2023 yılıdır. COPRAS yöntemine göre sıralamada; maliyetlerin arttığı değerlendirilmiştir. Buna rağmen fayda ölçütlerinin önceki yıllarda daha iyi durumda olduğu söylenebilir. Dolayısıyla maliyetlerin minimize edilip faydanın maksimize edilmesinden dolayı sıralamanın bu şekilde gerçekleştiği ifade edilebilir. Burada belirleyici olan maliyet ölçütleri olduğunu ifade etmek mümkündür.

Ar-Ge harcama ve çalışan sayısında düzenli artış olmuş ve patent ve faydalı model tescil sayısında düzenli artış olmadığı anlaşılmıştır. Fayda kriterinin etkisinin az olmasında, Ar-Ge faaliyetleri sonucu elde edilen kazanımların faydalı model ve patent tescil sayısında düzenli artış olmamasından kaynaklı olduğu söylenebilir. Ar-Ge çalışması sonuçları, patent başvuru ve dolayısıyla patent tescil sayısına yansımamış olabilir. Patent başvurusu sayısını artırmak için hedef kitleleri bilinçlendirmek için kamu ve özel kurumlarca bilgilendirme toplantıları, eğitim programları yapılması yararlı olabilir. Ayrıca başarılı start-up firma sahiplerini davet ederek tecrübe paylaşımı yapılması amacıyla toplantılar organize edilebilir.

Ar-Ge harcamaları ve Ar-Ge çalışan sayısına ulaşılabilmektedir. Ancak, Ar-Ge için donanım, yazılım vb. harcama kalemlerine detaylı olarak ulaşılamamaktadır. Veriler detaylı olmadığından kısıtlılık söz konusudur.

Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlarda, performans değeri en yüksek yılın ardından bu değere yakın yılları ve en düşük yıl ve bu değere yakın yılların tespiti mümkün olmaktadır. Bununla birlikte, yıllar itibariyle Ar-Ge performans sıralamasının yapılmasıyla, yıllar arasında kıyaslama imkânı vermektedir. Hangi yılın skor değerinin hangi yıldan yüksek veya düşük durumuna göre değerlendirme yapılabilmektedir. Yıllar itibariyle performans artışı düzenli devam etmiyorsa, sonraki yılın daha iyi olması için performans artışını sağlamaya yönelik faaliyetler planlanabilir. Performans artışı yeni önlemler alınabilir. Performans değeri en düşük yıl ve en düşük değere yakın yılların gözden geçirilmesi için yıllar arası kıyaslanması yapılabilir. Sonraki yıllarda yapılacak planlama, çalışmalara ışık tutması açısından yararlı olabilir. Değerin yüksek olduğu yıl ve düşük olduğu yıldaki yapılan faaliyetler ve piyasadaki yaşanan gelişmeler değerlendirilebilir.

Sağlık sektörü ve savunma sanayinde faaliyet gösteren sektörler gibi yüksek teknoloji içeren sektörlerin, Ar-Ge performansları ÇKKV yöntemlerinden TOPSİS gibi yöntemlerle değerlendirilebilir. Orta-Yüksek teknoloji içeren sektörlerin bilançolarda yer alan Ar-Ge harcaması sektör ortalaması verileri üzerinden sektör Ar-Ge performans değerlendirmesi ÇKKV yöntemleri ile yine performans değerlendirmeleri yapılabilir. Buna ilaveten ağırlıklı olarak ithal edilen dışa bağımlı ürünlerin yer aldığı sektörlerin Ar-Ge performans değerlendirmesi ÇKKV yöntemleri ile yapılabilir.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %19

Kaynaklar

[1] T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, On ikinci kalkınma planı, https://onikinciplan.sbb.gov.tr, Erişim tarihi: 02 Ocak 2025.

[2] A. Gülmez ve F. Yardımcıoğlu, OECD ülkelerinde Ar-Ge harcamaları ve ekonomik büyüme ilişkisi: panel eşbütünleşme ve panel nedensellik analizi (1990-2010). Maliye Dergisi, 163(1),335-353, 2012. https://ms.hmb.gov.tr/uploads/2019/09/163-18.

[3] G. Özkan ve H. Yılmaz, Ar-Ge harcamalarının yüksek teknoloji ürün ihracatı ve kişi başı gelir üzerindeki etkileri: 12 AB ülkesi ve Türkiye için uygulama (1996-2015). Bilgi Ekonomisi ve Yönetimi Dergisi,12(1),1-12,2017. https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/364578.

[4] S. Çınar ve B. Has, Türkiye ve seçili Asya ülkelerinde 2000 sonrası Ar-Ge yoğunluğu ve ekonomik büyüme ilişkisi: nedensellik analizi. Avrasya Sosyal ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi, 9(3), 1-16, 2022. Erişim adresi: https://dergipark.org.tr/tr/pub/asead/issue/71578/1114996.

[5] H. G. Diler ve T. Ö. Şişman, Türkiye ekonomisinde araştırma geliştirme harcamaları ile ekonomik büyüme ve işsizlik ilişkisi. Abant Sosyal Bilimler Dergisi, 24(2), 494-513, 2024. https://doi.org/10.11616/asbi.1453257.

[6] Türkiye İstatistik Kurumu, Araştırma geliştirme faaliyetleri, https://data.tuik.gov.tr, Erişim tarihi: 01 Aralık 2024.

[7] Türk Patent ve Marka Kurumu, İstatistikler, https://www.turkpatent.gov.tr/istatistikler, Erişim tarihi: 01 Aralık 2024.

[8] E. Ayçin ve E. Çakın, Ülkelerin inovasyon performanslarının ölçümünde ENTROPİ ve MABAC çok kriterli karar verme yöntemlerinin bütünleşik olarak kullanılması. Akdeniz İİBF Dergisi, 19(2), 326-351,2019. https://doi.org/10.25294/auiibfd.649275.

[9] U. Uyğun ve M. E. Durmuş, Türkiye'deki Ar-Ge harcamaları ve ekonomik büyüme ilişkisinin ekonometrik analizi. Uluslararası Ekonomik Araştırmalar Dergisi, 6(2), 31-42, 2020. Erişim adresi: https://dergipark.org.tr/tr/pub/ead/issue/57475/815201

[10] S. E. Özcan ve P. Özer, Ar-Ge harcamaları ve patent başvuru sayısının ekonomik büyüme üzerindeki etkileri: OECD ülkeleri üzerine bir uygulama. Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 18(1), 15-28, 2017. https://doi.org/10.18037/ausbd.550617.

[11] S. Taban ve M. Şengür, Türkiye'de Ar-Ge ve ekonomik büyüme. AİBÜ Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 14 (1),355-376, 2014.

[12] R. Yücel ve K. Ahmetoğulları, Ar-Ge harcamalarının firmaların net kâr değişimi ve hisse başına kârlılığına inovatif etkisi: BİST teknoloji yazılım ve bilişim sektöründe bir uygulama. Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 15(4), 2015. Erişim Adresi: https://dergipark.org.tr/tr/pub/basbed/issue/38791/455565.

[13] A. Sevinç, Türkiye'de Ar-Ge finansmanı: KOSGEB destek programının değerlendirilmesi. International Journal of Engineering Research and Development, 16(2), 507-519, 2024. https://doi.org/10.29137/umagd.1358857.

[14] E. İslamoğlu, Türkiye'de Ar-Ge harcamaları ve gayri safi yurt içi hasıla arasındaki nedensel ilişkinin analizi. Bankacılık ve Sermaye Piyasası Araştırmaları Dergisi, 2(4), 70-84, 2018. Erişim adresi: https://dergipark.org.tr/tr/pub/bspad/issue/35394/376063.

[15] A. Erciş ve M. Ünalan, Innovation: A comparative case study of Turkey and South Korea. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 235, 701-708, 2016. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.11.071

[16] K. W. Artz, P. M. Norman, D. E. Hatfield and L. B. Cardinal, A Longitudinal study of the impact of R&D, patents, and product innovation on firm performance. Journal of Product İnnovation Management, 27(5), 725-740, 2010. https://doi.org/10.1111/j.1540-5885.2010.00747.

[17] G. Licht and K. Zoz, Patents and R&D an econometric investigation using applications for German, European and US patents by German companies. Annales d'Economie Et De Statistique, 329-360, 1998. Erişim adresi: https://www.jstor.org/stable/20076120.

[18] R. Piergiovanni and E. Santarelli, The more you spend, the more you get? The Effects of R&D and capital expenditures on the patenting activities of biotechnology firms. Scientometrics, 94(2), 497-521, 2013. Doi:10.2791/45503.

[19] S. A. Meo, and A M. Usmani, Impact of R&D expenditures on research publications, patents and high-tech exports among European countries. European Review for Medical and Pharmacological Sciences, 18(1), 1-9, 2014. Erişim adresi: https://www.europeanreview.org/wp/wp-content/uploads/1-91.

[20] Y. L. Gamarra and G. Friedl, Declared essential patents and average total R&D expenditures per patent family. Telecommunications Policy, 47(2023), 102575, 2023. https://doi.org/10.1016/J.Telpol.2023.102575.

[21] M. Demir ve O. Geyik, Türkiye'de Ar-Ge ve inovasyon harcamalarının gelişim süreci ve ekonomik etkileri. Journal of Life Economics, 1(2), 171-190, 2014. https://doi.org/10.15637/jlecon.38.

[22] M. Tavana, K. Khalili-Damghani and R. Rahmatian, A Hybrid fuzzy MCDM method for measuring the performance of publicly held pharmaceutical companies. Annals of Operations Research, 226, 589-621, 2015. https://doi.org/10.1007/s10479-014-1738-8.

[23] E. Çakın ve A. Özdemir, Bölgesel gelişmişlikte Ar-Ge ve inovasyonun rolü: DEMATEL tabanlı Analitik Ağ Süreci (DANP) ve TOPSIS yöntemleri ile bölgelerarası bir analiz. Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 30(1), 115-144, 2015. Erişimadresi: https://dergipark.org.tr/tr/pub/deuiibfd/issue/22716/242453.

[24] S. Uzun ve H. Kazan, Çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP TOPSIS ve PROMETHEE karşılaştırılması: Gemi inşada ana makine seçimi uygulaması. Journal of Transportation and Logistics,1(1), 99-113, 2016. http://dx.doi.org/10.22532/jtl.237889

[25] M. Varmazyar, M. Dehghanbaghi and M. Afkhami, A Novel hybrid MCDM model for performance evaluation of research and technology organizations based on BSC approach. Evaluation and program planning, 58, 125-140, 2016. http://dx.doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2016.06.005.

[26] M. Oturakçı, İşletmelerde inovasyon faaliyetlerini etkileyen parametrelerin belirlenmesi ve önceliklendirilmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33(2), 1-8,2018. https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.508075.

[27] Ö. Belgin ve B. A. Avşar, Türkiye'de bölgeler ve iller düzeyinde Ar-Ge ve yenilik performansının Gri İlişkisel Analiz yöntemi ile ölçülmesi. Verimlilik Dergisi, (2), 27-48, 2019. Erişim adresi: https://dergipark.org.tr/tr/pub/verimlilik/issue/44167/5 44921.

[28] B. Oralhan ve M. A. Büyüktürk, Avrupa Birliği ülkeleri ve Türkiye'nin inovasyon performansının çok kriterli karar verme yöntemleriyle kıyaslanması. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (16), 471-484, 2019. https://doi.org/10.31590/ejosat. 571284.

[29] F. F. Altıntaş, İnovasyon performanslarının ENTROPİ tabanlı Gri İlişkisel Analiz yöntemi ile değerlendirilmesi: G7 grubu ülkeleri örneği. Adnan Menderes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 7(2), 151-172, 2020. https://doi.org/10.30803/adusobed.802738.

[30] A. Yoğunlu ve Y.C. Çopuroğlu, İllerin yenilik ekosistemine dayalı Ar-Ge ve yenilik performanslarının PROMETHEE yöntemi ile karşılaştırılması. The Journal of Academic Social Science Studies, 14(86), 421-438, 2024. Doi: 10.29228/JASSS.48786.

[31] İ. Dağlı, Türkiye'de bölgesel inovasyon etkinliğinin değerlendirilmesi: Düzey 2 bölgelerine yönelik ampirik bir analiz. Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, (61), 329-352, 2022. https://doi.org/10.18070/erciyesiibd.998090.

[32] M. Karahan ve S. Duran, Küresel inovasyon endeksi verilerine göre Türk Devletleri Teşkilatına üye ülkelerin inovasyon performanslarının analizi. Beykoz Akademi Dergisi, 11(1), 51-70, 2023. https://doi.org/10.14514/beykozad.1179838.

[33] İ. G. Meral, BRICS-T Ülkelerinin inovasyon performanslarının MEREC-MARCOS yöntemi ile değerlendirilmesi. Kastamonu Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 25(2), 550-571, 2023. Doı: 10.21180/iibfdkastamonu.1344363.

[34] D. Murat ve S. Güzel, Rekabetçilik ve inovasyon performansı değerlendirmesi: OECD ülkeleri üzerine ampirik bir inceleme. Alanya Akademik Bakış, 8(3), 909-922, 2024. https://doi.org/10.29023/alanyaakademik.1510889.

[35] M. Maral, cross-country analysis of research and development efficiency in higher education: Data

Envelopment Analysis and hybrid Multi-Criteria Decision-Making approach. Journal of the Knowledge Economy, 1-34, 2024. https://doi.org/10.1007/s13132-024-02518-3.

[36] E. Ayçin ve Ç. Orçun, Mevduat bankalarının performanslarının ENTROPİ ve MAIRCA yöntemleri ile değerlendirilmesi. Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 22(42), 175-194, 2019. https://doi.org/10.31795/baunsobed.657002.

[37] E. Çınaroğlu, Yenilikçi girişimlere ait faaliyetlerin ENTROPİ destekli MABAC yöntemi ile değerlendirilmesi. Journal of Entrepreneurship and Innovation Management, 9(1), 111-135,2020. Erişim adresi: https://dergipark.org.tr/en/pub/jeim/issue/60043/868114.

[38] Y. Akgül, Çok kriterli karar verme yöntemleriyle Türk bankacılık sisteminin 2010-2018 yılları arasındaki performansının analizi. Finans Ekonomi ve Sosyal Araştırmalar Dergisi, 4(4), 567-582, 2019. https://doi.org/10.29106/fesa.655722.

[39] A. Özbek, Çok kriterli karar verme yöntemleri ve Excel ile problem çözümü. Seçkin Yayıncılık, Ankara, 197, 2017.

[40] A. Organ ve E. Yalçın, Performance evaluation of research assistants by COPRAS method. European Scientific Journal, 12(10), 102-109, 2016.

[41] D. R. Babak ve E. N. Nacar, COPRAS Yöntemi ile Tedarikçi Seçimi. Çok kriterli karar verme Yöntemleri Ms Excel çözüm uygulamaları, 1. Baskı, Ankara, Türkiye: Nobel Akademik Yayıncılık, M. Kabak, Y. Çınar, Editör, böl.11, ss.183-196, 2020

[42] E. Aksoy, N. Ömürbek ve M. Karaatlı, AHP temelli MULTIMOORA ve COPRAS yöntemi ile Türkiye kömür işletmelerinin performans değerlendirmesi. Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 33(4), 1-28, 2015. https://doi.org/10.17065/huiibf.10920.

[43] A. Dayanır, B. Durgun ve F. Durgun, Ar-Ge harcaması, patent ve ekonomik büyüme bağlantısı: ABD ve Japonya üzerine karşılaştırmalı bir çalışma. JOEEP: Journal of Emerging Economies and Policy, 6(2), 72-80, 2021. Erişim adresi: https://dergipark.org.tr/tr/pub/joeep/issue/60720/878979.

[44] M. Kim, J. E. Kim, Y. W. Sawng, and K. S. Lim, Impacts of innovation type SME's R&D capability on patent and new product development. Asia Pacific Journal Of Innovation and Entrepreneurship, 12(1), 45-61, 2018. Doı 10.1108/APJIE-04-2018-043.

[45] A. Ekinci, Z. Koçak ve M. Benli, OECD ülkeleri örneğinde Ar-Ge harcamalarının ekonomik büyüme üzerindeki etkisi. Sakarya İktisat Dergisi, 12(2), 241-252. 2023. Erişim adresi: https://dergipark.org.tr/tr/pub/sid/issue/78288/1319204.

[46] N. Işık ve E. C. Kılınç, Bölgesel kalkınma'da Ar-Ge ve inovasyonun önemi: karşılaştırmalı bir analiz. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 6(2), 9-54, 2011. Erişim adresi: https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/65513

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 1126-1134

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Sn-Ba-Cu-O seramiklerin manyetik kaldırma ve manyetik sertlik performansının ZnO katkılamasına bağlı gelişimi

Development of magnetic levitation and magnetic hardness performance of Sn-Ba-Cu-O ceramics due to ZnO doping

Selva Büyükakkaş[1,*]

[1] *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 51240, Niğde Türkiye*

Öz

Farklı oranlarda Cu/Zn katkılanarak katı-hal tepkime yöntemiyle sentezlenen $Sn_2Ba(Cu_{2-x}Zn_x)_2O_y$ seramiklerin yapısal özellikleri önceki çalışmamızda incelendi. Bu çalışmada, 470 mT yüzey manyetik alan şiddetine sahip kalıcı mıknatıs kullanılarak manyetik kaldırma kuvveti (MLF) ölçümleri gerçekleştirildi. Mıknatıs ile seramik malzeme arasındaki kuvvet ölçümünde, statik olarak düşey eksendeki mesafenin fonksiyonu olarak önemli histerezis davranış gözlendi. Sıfır alan soğutması (ZFC) ve alan soğutması (FC) şartlarında, katkılamanın kuvvet ölçümleri ve manyetik sertlik hesaplamalarına etkisine odaklanıldı. ZFC'de katkı artışıyla kuvvetin azalması, tane sınırlarındaki zayıf bağlar, çatlaklar ve tane boyutu küçülmesi ile açıklandı. ZFC'de kuvvet eğrilerinden, manyetik sertlik hesaplamaları yapıldı. FC'de katkının artması ile etkili olması gereken kaldırma kuvveti, akı yakalama merkezlerinin ortaya çıkması ile yerini çekici kuvvete bıraktı. Ayrıca, FC'de 3 döngülü kuvvet eğrilerinden, numunelerin duyarlı olduğu aralık 0-35 mm olarak belirlendi. Katkılama manyetik sertlik değerlerinde azalmaya neden oldu. FC'de, kuvvet eğrileri bütünsel değerlendirildiğinde, katkının maksimum itici ve çekici kuvveti artırdığı ve itici kuvvetin maksimum 0.7 mN'a, çekici kuvvetin ise maksimum 3.25 mN'a ulaştığı görüldü.

Anahtar kelimeler: Manyetik kaldırma kuvveti, Manyetik sertlik, Sn-Ba-Cu-O, Alan altında soğutma (FC), Alansız soğutma (ZFC)

Abstract

The structural properties of $Sn_2Ba(Cu_{2-x}Zn_x)_2O_y$ ceramics synthesized by solid-state reaction method with different Cu/Zn doping ratios were investigated in our previous study. In this study, magnetic levitation force (MLF) measurements were performed using a permanent magnet with a surface magnetic field strength of 470 mT. In the force measurement between the magnet and the ceramic material, significant hysteresis behavior was observed statically as a function of the distance in the vertical axis. We focused on the effect of doping on force measurements and magnetic stiffness calculations under zero field cooling (ZFC) and field cooling (FC) conditions. The decrease of force with increasing doping in ZFC is explained by weak bonds at grain boundaries, cracks and grain size reduction. Magnetic stiffness calculations were made from the force curves in ZFC. The levitation force, which should be effective with the increase in doping in FC, was replaced by an attractive force with the emerge of flux trapping centers. In addition, from the 3-cycle force curves in FC, the range in which the samples are sensitive was determined as 0-35 mm. The doping caused a decrease in magnetic stiffness values. In FC, when the force curves were evaluated holistically, it was seen that the doping increased the maximum repulsive and attractive force and the repulsive force reached a maximum of 0.7 mN and the attractive force reached a maximum of 3.25 mN.

Keywords: Magnetic levitation force, Magnetic stiffness, Sn-Ba-Cu-O, Field cooled (FC), Zero field cooled (ZFC)

1 Giriş

Malzeme içerisinde akımın fark edilebilir bir enerji kaybı olmadan gerçekleşmesi olarak bilinen süperiletkenlik, yirminci yüzyılın en büyük bilimsel keşiflerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bu olayın keşfinden sonra, her bir malzemeye özgü süperiletken geçiş sıcaklığı olan kritik sıcaklığın (T_c) altında soğutma ile elektrik direncin aniden sıfıra düşmesi olayı vuku bulmuştur [1].

Sıfır dirence ve mükemmel diamanyetizmaya sahip süperiletken malzemeler 1911 yılında H.K. Onnes tarafından keşfedilmiştir. Meissner ve Ochsenfeld 1933'de, yaptıkları çalışmayla T_c kritik sıcaklığının altında Sn ve Pb'un manyetik alan içerisinde, mükemmel iletken gibi davranmadıklarını keşfetmişlerdir [2, 3]. Süperiletkenliğin keşfinden 1986 yılına kadar geçen zamanda geçiş sıcaklığı ile ilgili araştırmalar oldukça azdır. 1986 yılında Bednorz ve Müller tarafından yüksek sıcaklık süperiletken seramiklerin (HTSC) keşfi ile birlikte maliyetinin büyük ölçüde düşmesi neredeyse her alanda uygulanabilirliği ve bu konu üzerine yapılan çalışmaların günbegün artmasına sebep olmuştur [4].

Bir mıknatısın süperiletken üzerinde havalanması evrensel olarak gözlemlenen ve süperiletken uygulamalar için dikkat çekici özelliklerden biridir [5]. Tek kristalli YBCO (Yttrium Barium Copper Oxide) süperiletkenler,

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: sakkas@ohu.edu.tr (S. Büyükakkaş)
Geliş / Received: 01.06.2025 Kabul / Accepted: 28.06.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1711432

yüksek kritik sıcaklıkları, güçlü akı tuzaklama kapasiteleri, yüksek manyetik kaldırma kuvvetleri ve kararlı süspansiyon özellikleri sayesinde, günümüzde dünya genelinde önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Bu üstün manyetik özellikleri sayesinde, YBCO süperiletkenler; yüksek alanlı sabit mıknatıslar, manyetik yataklar, volan sistemleri, elektrik motorları, jeneratörler, maglev (manyetik levitasyon) sistemleri ve havada asılı ulaşım teknolojileri gibi pek çok ileri mühendislik uygulamasında büyük bir potansiyel sunmaktadır. Ayrıca, süperiletken volan enerji depolama sistemleri, yüksek devirli rotorlar için sürtünmesiz yatak çözümleri, güç elektroniği devreleri ve kompozit malzeme tasarımları da bu teknolojinin öne çıkan kullanım alanları arasında yer almaktadır. Yüksek sıcaklık süperiletken (HTS) teknolojisi, özellikle rüzgâr türbinleri ve güneş panelleri gibi kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarıyla birlikte, süperiletken manyetik enerji depolama (SMES) sistemleri ve volan teknolojileri aracılığıyla, akıllı şebekeler üzerinden çeşitli endüstriyel uygulamalara entegre edilebilecek önemli bir enerji depolama çözümü sunmaktadır [6, 7].

Bu tür uygulamaların temelinde yer alan manyetik kaldırma olgusu, süperiletkenlerin mükemmel diamanyetik davranışları ve Meissner etkisi ile ilişkilidir. Bu durum, süperiletken malzeme içerisinde manyetik akının hapsolması yoluyla fiziksel olarak açıklanmaktadır [8].

Birçok araştırmacı tarafından süperiletkenliğin temel mekanizmalarının anlaşılması ve geliştirilmesi amacıyla HTS malzemeler ile kalıcı mıknatıslar arasındaki manyetik kuvvet etkileşimi detaylı bir şekilde incelenmiştir [9,10]. Manyetik kuvvet hesaplamaları genellikle Bean'in kritik durum modeline [11] dayanmaktadır. Daha sonra Johansen vd, teorik sonuçların deneysel verilerle uyumunu ortaya çıkarmak için Bean modelini genişletmişlerdir [12]. Bean modeli, aynı zamanda manyetik kaldırma kuvvetinin deneysel ölçümlerini açıklama konusunda da başarıyla uygulanmıştır [13].

Manyetik kaldırma kuvveti ölçümleri, yüksek sıcaklık süperiletken malzeme ile kalıcı mıknatıs arasındaki düşey mesafenin değiştirilmesiyle gerçekleştirilir. Kritik akım yoğunluğu ve mıknatıslanma gibi karakteristik özelliklerin belirlenmesine yönelik süperiletken çalışmaları kapsamında, bir, iki veya üç boyutlu olarak tasarlanmış kaldırma kuvveti ölçüm sistemlerinden yararlanılmaktadır [14–17].

Süperiletken ve kalıcı mıknatıs arasındaki kuvvet yerçekiminin tersi yönde belirlendiğinden, en yaygın kullanılan ölçüm sistemi süperiletken veya kalıcı mıknatısın ağırlığını dengeleyen düşey mesafenin değiştiği ölçüm sistemidir [18].

Kuvvet ölçümlerini etkileyen pek çok parametre bulunmaktadır. Bunlar arasında numune kalınlığı [19,20] ile mıknatısların boyutları ve düzeni [21,22], kritik akım yoğunluğu, tane boyutu [23], soğutma sıcaklığı [24], tane yönelimi [25, 26], numunenin mıknatısa yaklaşma hızı [27] yer almaktadır. Savaşkan vd [28], MgB_2 süperiletkeni üzerinde, 33 K ve 37 K sıcaklıklarda alan soğutmalı ve sıfır alan soğutmalı şartlarında manyetik kaldırma deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Sıfır alan soğutmalı durumda ve 33 K sıcaklıkta, en yüksek kuvveti değeri 28.76 N olarak ölçülmüştür. Süperiletkenlerin kullanıldığı kaldırma sistemlerinde manyetik sertlik davranışına ilişkin ilk çalışmalar ise Moon vd tarafından gerçekleştirilmiştir [29].

Dış çevre koşullarının etkisiyle araç gövdesinin düşey eksendeki konumunda meydana gelen değişkenlikler, Maglev sistemlerinin kararlılığı üzerinde doğrudan etkili olduğundan, sistem performansının düşey doğrultuda detaylı bir şekilde değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır [30]. Bunu dikkate alarak 77 K sıvı azot sıcaklığında alanlı ve alansız soğutmalı şartlarda, farklı yüksek sıcaklık süperiletken ve kalıcı mıknatıs arasındaki düşey doğrultuda manyetik kaldırma kuvveti ölçümleri ve manyetik sertlik hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Süperiletkenlerin sıfır alan ve alan soğutma şartları etkisinde kalıcı mıknatısa duyarlı olduğu aralık belirlenmiştir. Deneysel olarak elde edilen manyetik kaldırma kuvveti verilerinin fit edilmesi sonucunda, sistemin teorik beklentilerle uyumlu davrandığı ortaya konmuştur. Elde edilen bulguların, günümüzde yüksek öneme sahip olan yüksek sıcaklık süperiletken tabanlı Maglev sistemlerinin teknolojik uygulamalarına katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

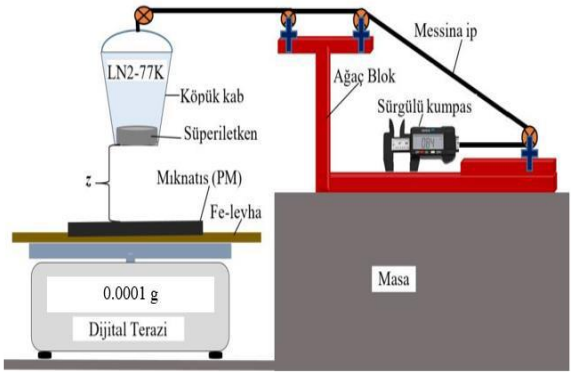
2 Materyal ve yöntem

$Sn_2Ba(Cu_{2-x}Zn_x)_2O_y$ (x = 0.0, 0.4, 0.8, 1.0) nominal kompozisyona sahip yüksek sıcaklık seramikler katı-hal reaksiyon yöntemiyle sentezlenmiştir. Zn katkılaması yapılmak suretiyle S0, S4, S8, S10 şeklinde etiketleme yapılan seramik malzemelerin yapısal özellikleri katkıya bağlı olarak incelenmiştir. Yapısal analizler sonucunda, saf ve katkılanmış numunelerde kristalografik parametreler, ortalama kristalit boyutu, faz dönüşümü ve tane yapıları belirlenmiştir. Saf numune küçük taneli, sürekli gözenekli bir yapıya sahipken, katkılanmış numunelerde tanelerin büyüdüğü ve gözenekliliğin azaldığı gözlenmiştir. S0 numunesindeki birincil ortorombik 212 fazı, S10 numunesinde en yoğun tetragonal 211 fazına dönüşmüştür. Buradan Zn katkısının ortorombik 212 fazının yapısını bozduğu ve tetragonal 211 fazının gelişimi üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Cu yerine Zn katkılaması, kafes parametrelerinde monoton olmayan bir değişime neden olmuştur. ZnO katkı maddesindeki artışla kristal hacminde belirgin bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Bu durum, Zn ve Cu elementlerinin benzer iyonik yarıçaplara ve değerlik durumlarına sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, ortorombik ve tetragonal fazlarda kristal hacimler arasında önemli bir fark olmamakla birlikte, tetragonal fazın kristal hacminin ortorombik faza göre biraz daha büyük olduğu belirlenmiştir. Önceki çalışmada belirtildiği gibi ZnO katkısıyla ortorombik fazdan tetragonal faza geçiş % 15 civarında görülmüştür [31]. Bu da süperiletkenlerde oldukça düşük faz dönüşümü anlamına gelir. Levitasyon ölçümlerinde de bu düşük faz dönüşümünün etkisi görülmüştür.

2.1 Deneysel düzenek

Manyetik kaldırma kuvveti ölçümleri, Şekil 1.'deki deneysel düzenek kullanılarak, S0, S4, S8 ve S10 şeklinde etiketlenen seramik malzemelerin her biri için, 470 mT değerindeki kalıcı mıknatıs etkisinde statik olarak Şekil 2.'

de görüldüğü gibi düşey eksende değişen mesafeye bağlı olarak ele alınmıştır.



Şekil 1. Süperiletken ve kalıcı mıknatıs arasındaki manyetik kaldırma kuvveti ölçüm düzeneği [32]

Şekil 2. Sıvı azot ile soğutulmuş süperiletkenin kalıcı mıknatısa uyguladığı manyetik kaldırma kuvveti [27, 33]

Manyetik kaldırma kuvveti ölçüm düzeneği kalıcı mıknatıs, 0.001 g hassasiyetli dijital terazi, ana yapıya monte edilmiş 0.01 mm hassasiyetli dijital kumpasla hareket ettirilen asansör sistemi ve sıvı azot, seramik numuneyi taşıyan çevresi alüminyum folyo kaplı köpük yalıtım kabından oluşmaktadır. Deneysel düzeneğin kurulumundan sonra, dijital terazi ve kumpas ayarlaması yapılmıştır. Manuel olarak ölçüm yapılan sistemde her bir malzeme 77 K sıvı azot sıcaklığında soğutulmuştur.

2.2 Deneysel yöntem

Alanlı soğutma ve alansız soğutma şartları altında silindirik yapılı seramik malzemelerin merkez normal çizgisi tüm deney boyunca kalıcı mıknatısın oluşturduğu manyetik alanın düşey bileşeninin tepe çizgisi ile aynı düzlemde olacak şekilde ayarlanmıştır. Manyetik kaldırma kuvveti ölçümleri, seramik malzeme ile kalıcı mıknatıs arasındaki mümkün olan en küçük yaklaşma mesafesi olan 2.5 mm′den maksimum 55 mm'ye kadar periyodik olarak gerçekleştirilmiştir.

Alansız soğutma şartında, kalıcı mıknatıstan 55 mm düşey mesafede bulunan seramik malzeme alüminyum folyo ile yalıtılmış sıvı azot dolu köpük kabın içerisine konulmuştur. Kaldırma kuvveti ölçümleri, ısıl dengeye ulaştıktan sonra, yaklaşma süreci boyunca 55 mm′den 1 mm′ye ve uzaklaşma süreci boyunca 1 mm′den 55 mm′ye kadar periyodik ölçümler alınmak suretiyle yaklaşık 10 s′lik gevşeme süresi boyunca bekleyerek yapılmıştır.

Alanlı soğutma şartı altında, alüminyum folyo ile ısıca yalıtılmış köpük kap olası en minimum mesafeye (~2.5 mm) kadar kalıcı mıknatısa yaklaştırılmıştır. Seramik malzeme kabın içerisine konulmuş ve manyetik dengeye gelmesi için bir süre bekletilmiştir. Köpük kap sıvı azotla doldurulmuş ve 10-15 dk boyunca manyetik dengelenmenin sağlanması için seramik malzeme kalıcı mıknatısın etkisinde bırakılmıştır. Saf ve katkılı malzemeler sistemin el verdiği en yakın mesafe olan 2.5 mm′den başlayarak 55 mm′ye kadar periyodik olarak manyetik alandan uzaklaştırılmıştır. Her bir ölçüm manuel olarak kaydedilmiştir. Bu ölçümler periyodik bir şekilde yaklaşma süreci boyunca 2.5 mm′ye kadar devam etmiştir.

Alanlı soğutma şartları altında seramik malzemelerin akı tuzaklarının daha belirgin bir biçimde incelenebilmesi için düşey yaklaşma ve uzaklaşma döngüsüne iki döngü daha eklenerek 3 döngülü çalışma yapılmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

Manyetik kaldırma kuvveti, bir süperiletkenin üretim yöntemine bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik göstermektedir. Özellikle eriyik büyütme yöntemiyle üretilen süperiletkenlerde bu kuvvet oldukça yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda, 77 K sıcaklığında ölçülen tek taneli süperiletkenlerin oluşturduğu kaldırma kuvveti, kullanılan kalıcı mıknatısın boyutuna bağlı olarak yaklaşık 50–150 N arasında değişmektedir [34, 35]. Bu değerler, süperiletkenler ile mıknatısların birlikte kullanılması durumunda birkaç tonluk yüklerin havaya kaldırılmasının mümkün olduğunu göstermektedir. Süperiletkenlerin ürettiği kaldırma kuvveti $F = m\frac{dH}{dx}, m = MV, M = AJ_c r$ ile verilmektedir [36]. M birim hacim başına mıknatıslanma, J_c yüksek sıcaklık süperiletkenin kritik akım yoğunluğu, m süperiletkenin manyetik momenti, $\frac{dH}{dx}$ kalıcı mıknatısın oluşturduğu manyetik alan gradyenti, A, süperiletkenin geometrisine bağlı bir sabit ve r süperiletken numunenin oluşturduğu diamanyetik akım halkasının yarıçapıdır. Manyetik kaldırma kuvveti J_c akım yoğunluğu ve süperiletkenin tane boyutu (r) ile orantılıdır. J_c ve r'ye ek olarak, süperiletkenin boyutu, ölçüm için kullanılan mıknatısın manyetik gücü ve süperiletkenler için soğutma yöntemi gibi diğer deneysel parametreler de manyetik kaldırma kuvvetini etkiler [37, 38]. Bu bağlamda, süperiletken ile kalıcı mıknatıs arasındaki etkileşimi hem teorik hem de deneysel olarak inceleyen çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir [28, 39-41].

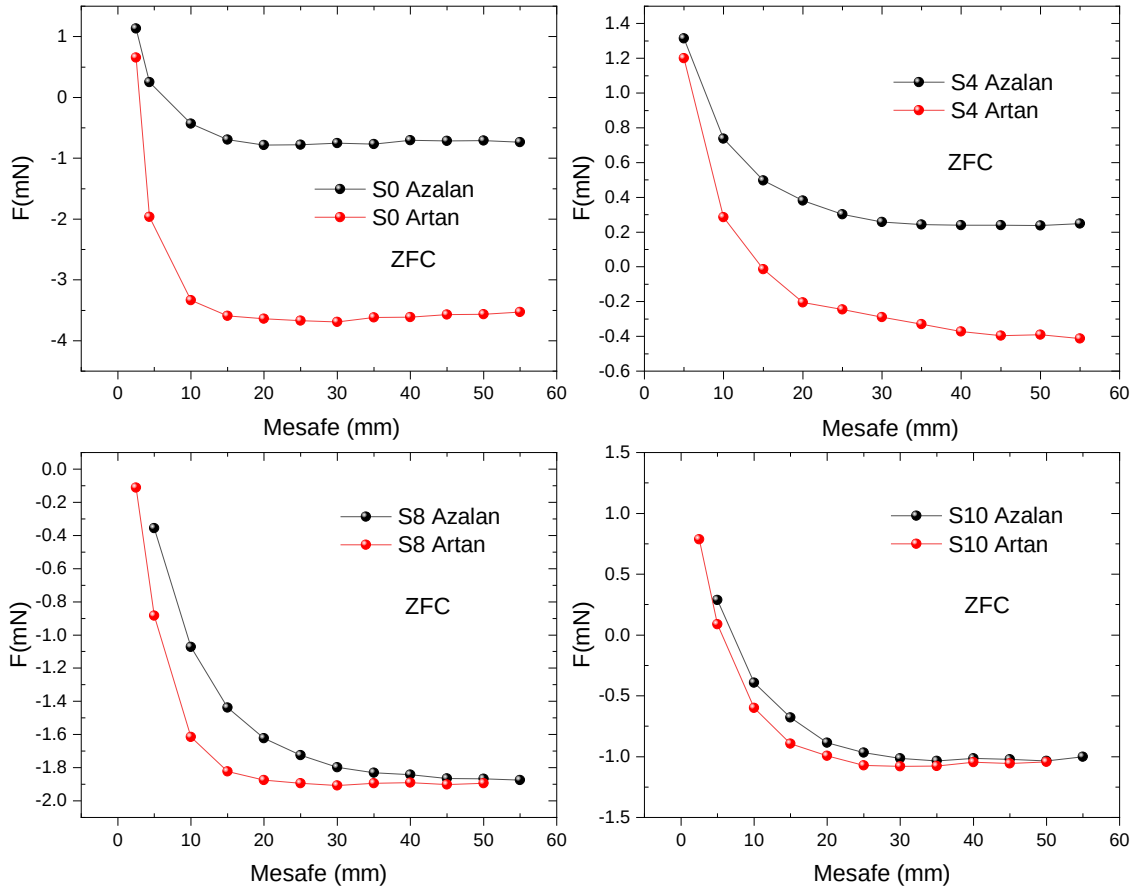
3.1 Alansız soğutma altında Sn-Ba-Cu-O sisteminin manyetik kaldırma kuvvet özellikleri

Süperiletken kaynaklı olarak numune boyutu, tane yönelimi, tane yarıçapı, kritik akım yoğunluğu, soğutma sıcaklığı ve soğutma yöntemi gibi faktörler manyetik kaldırma kuvvetini etkiler. Kalıcı mıknatısın manyetik kaldırma kuvvetine etkisi ise manyetik alan dağılımı ve manyetik akı yoğunluğu gibi faktörlere bağlıdır. Kaldırma

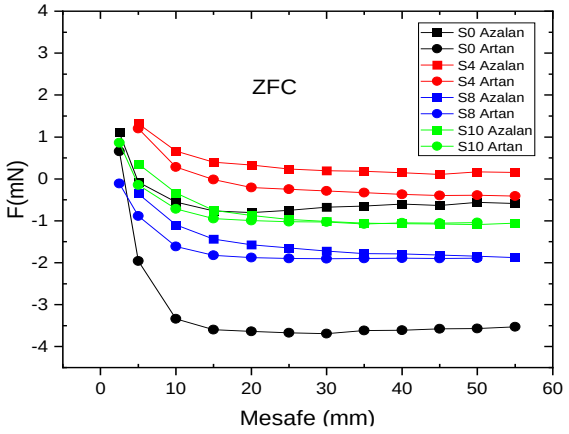
kuvvetini oluşturan iki ana unsur süperiletken ve kalıcı mıknatıs olmasına rağmen, ortaya ortak tek bir kaldırma kuvveti çıkar. İtici ve çekici kuvvetlerin oluşması, manyetik kaldırma kuvveti ölçümünde süperiletken ile kalıcı mıknatıs arasındaki düşey mesafenin arttırılması (uzaklaşma) ve azaltılması (yaklaşma) ile mümkündür [37]. Süperiletkenlerin manyetik kaldırma kuvveti süperiletkenlerin soğutma yöntemine bağlıdır. Hiçbir dış manyetik alanın olmadığı alansız soğurma altında süperiletken mükemmel diamanyetik duruma sahiptir. Süperiletkenler mıknatısın manyetik alanını iterler [42]. Alansız soğutma şartında süperiletken ile kalıcı mıknatıs arasındaki en büyük itici kuvvet sıfıra en yakın mesafede ortaya çıkar. Çekici kuvvet, süperiletkendeki tuzaklanan manyetik alan ile kalıcı mıknatıs arasında oluşan manyetik etkileşim nedeniyle mesafenin artışıyla gerçekleşir. Malzemenin yapısında üretimden kaynaklı oluşan çatlaklar ve zayıf bağlar manyetik kaldırma kuvvetinde azalmaya neden olurken, akı çivileme merkezlerinin sayısındaki artış süperiletken içerisinde sabitlenen manyetik alanın artışına sebep olur [43].

Sn-Ba-Cu-O seramik sistemlerin düşey eksende mesafeye bağlı kuvvet ölçümleri 77 K sıvı azot ortamında hem alansız hem de alanlı soğutma şartlarında kalıcı mıknatısa yaklaşma ve uzaklaşma durumunda ölçüldü. Seramik malzemenin kalıcı mıknatısla arasındaki en uzak mesafe 55 mm iken, birbirine yaklaştığı imkânların elverdiği en yakın mesafe 2,5 mm idi. Manyetik kaldırma kuvveti ölçümlerinde kullanılan disk şeklindeki Nd-B-Fe kalıcı mıknatıs 470 mT değerindeydi. Merkez normal ekseninde simetrik ve homojen bir manyetik alanın oluşması için, kalıcı mıknatıs silindirik disk şeklinde seçilmiştir. Alansız soğutma şartı altında, seramik malzemelerin hepsi histerezis davranış göstermiştir.

Şekil 3, saf ve farklı oranlarda çinko ile katkılanarak üretilen seramik malzemelere ait alansız soğutma şartlarında mesafenin azalması ve artması durumlarındaki manyetik kaldırma kuvveti ölçüm eğrilerini tek tek gösterirken, Şekil 4 toplu olarak tüm numunelerin kaldırma kuvvetinin mesafeye göre değişimini göstermektedir. Yaklaşık 35 mm mesafeye kadar kuvvet de bir değişim gözlenmezken, 35-2.5 mm'lik bölgede belirgin bir değişim görülmüştür. En büyük kaldırma kuvvet değeri (F_{mak}) S0 malzemesinde deneysel eğrinin fit edilmesiyle Tablo 1. de verildiği gibi F_z = 11.5387 mN olarak hesaplanmıştır. Tüm numunelere ait kuvvet eğrileri incelendiğinde katkılamanın çekici kuvveti azalttığı ve itici kuvveti arttırdığı ortaya konmuştur. Katkı oranının artışı, kaldırma kuvvetine ait yaklaşma ve uzaklaşma eğrileri arasındaki bölgenin büyüklüğünde bir azalma ile sonuçlanmıştır. Bu durum, süperiletken içerisindeki akı sabitleme merkezlerinin sayısındaki azalış veya bu merkezlerin çapındaki küçülmeden kaynaklanan zayıf akı tuzaklamasını düşündürür.



Şekil 3. Alansız soğutma altında S0, S4, S8 ve S10 seramiklerine ait manyetik kaldırma kuvvetinin mesafeye bağlı değişimi



Şekil 4. Alansız soğutma durumunda S0, S4, S8 ve S10 seramiklerine ait manyetik kaldırma kuvvetinin mesafeye bağlı değişimi

Seramik malzemelerin kalıcı mıknatısa yaklaşma ve uzaklaşması durumunda elde edilen deneysel manyetik kaldırma kuvveti mesafe eğrilerinin, $F = F_0 + ae^{bz}$ denklemine fit edilmesiyle elde edilen parametreler Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmektedir. F, manyetik kuvvetin konuma bağlı değişimini göstermektedir. F_0, kuvvetin z=0 noktasındaki değeri değildir, z→∞ giderken kuvvetin yaklaştığı sabit değeri temsil eder. e^{bz}→0 olduğunda F→F_0 olur. a genlik katsayısı, manyetik kuvvetin büyüklüğünü belirler. b üstel değişim katsayısı ise kuvvetin z konumuna göre ne kadar hızlı değiştiğini gösterir. b>0 ise kuvvet üstel olarak artar, b<0 ise üstel olarak azalır. r^2 korelasyon değerlerine bakacak olursak, hem yaklaşma hem de uzaklaşma verilerinde sonucun oldukça iyi olduğunu söylemek mümkündür.

Tablo 1. Mesafe artarken S0, S4, S8, S10 seramikleri için elde edilen en iyi F_{mak}, F_o, a, b ve r^2 değerleri

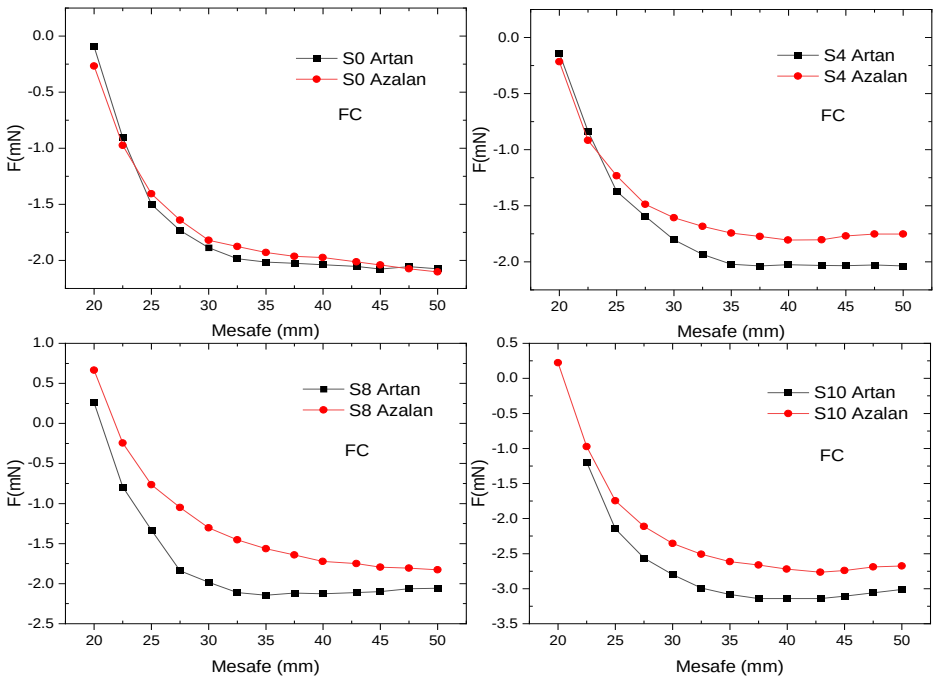
Malzeme	$F = F_0 + ae^{bz}$				
	F_{mak} (mN)	F_0 (mN)	a (mN)	(mm^{-1})	r^2
S0	11.5387	-3.5963	15.1350	-0.5089	0.9970
S4	2.9971	-0.3671	3.3642	-0.1551	0.9940
S8	1.3483	-1.9021	3.2504	-0.2366	0.9996
S10	1.8895	-1.0685	2.9580	-0.1869	0.9992

Tablo 2. Mesafe azalırken S0, S4, S8, S10 seramikleri için elde edilen en iyi F_{mak}, F_o, a, b ve r^2 değerleri

Malzeme	$F = F_0 + ae^{bz}$				
	F_{mak} (mN)	F_0 (mN)	a (mN)	(mm^{-1})	r^2
S0	2.6829	-1.1255	3.8084	-0.1777	0.9975
S4	2.4511	0.2386	2.2125	-0.1451	0.9989
S8	1.7509	-1.8516	3.6025	-0.1550	0.9985
S10	1.9151	-1.0344	2.9495	-0.1304	0.9995

3.2 Alanlı soğutma altında Sn-Ba-Cu-O sisteminin manyetik kaldırma kuvveti özellikleri

Alanlı soğutma şartında, kalıcı mıknatıs süperiletkenin altına veya üstüne yerleştirilir ve süperiletken soğutulur. Alanlı soğutma altında, süperiletkenler mıknatısların manyetik alanını yakalar, mükemmel diamanyetizmaya sahip olmalarından dolayı mıknatısları sadece itmekle kalmaz, aynı zamanda mıknatısları çekerler. Alanlı soğutma altında süperiletken kalıcı mıknatısı hem iter hem de çeker [42]. Manyetik alanın süperiletken içerisinde hapsolduğunu doğrulamanın en basit yolu süperiletken yakınına bir demir malzemenin getirilmesi olacaktır.

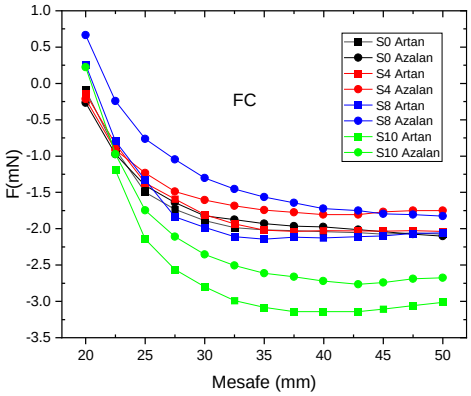


Şekil 5. Alan soğutması altında S0, S4, S8 ve S10 seramiklerine ait manyetik kaldırma kuvvetinin mesafeye bağlı değişimi

Şekil 5′de saf S0, katkılanmış S4, S8 ve S10 seramiklerine ait alan soğutma altında kaldırma kuvvetinin mesafeye bağlı eğrileri mıknatısa yaklaşma ve uzaklaşma durumları için tek tek verilirken, Şekil 6 toplu olarak tüm numunelerin kaldırma kuvvetinin mesafeye göre değişimini göstermektedir. Şekil 5 ve Şekil 6 incelendiğinde, süperiletkenin manyetik etkileşime karşı duyarlı olduğu bölgenin 0–35 mm mesafe aralığında yer aldığı ve bu aralıkta dikkate değer bir değişimin gözlendiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle, deneysel ölçümlerimizde 35 mm'nin üzerindeki mesafeler dikkate alınmamıştır. Manyetik kaldırma kuvveti eğrileri bütünsel olarak değerlendirildiğinde, katkılamanın hem maksimum itici kuvveti hem de maksimum çekici kuvveti artırdığı görülmüştür. İtici kuvvet maksimum 0.7 mN′a, çekici kuvvet ise maksimum 3.25 mN′a ulaşmıştır.

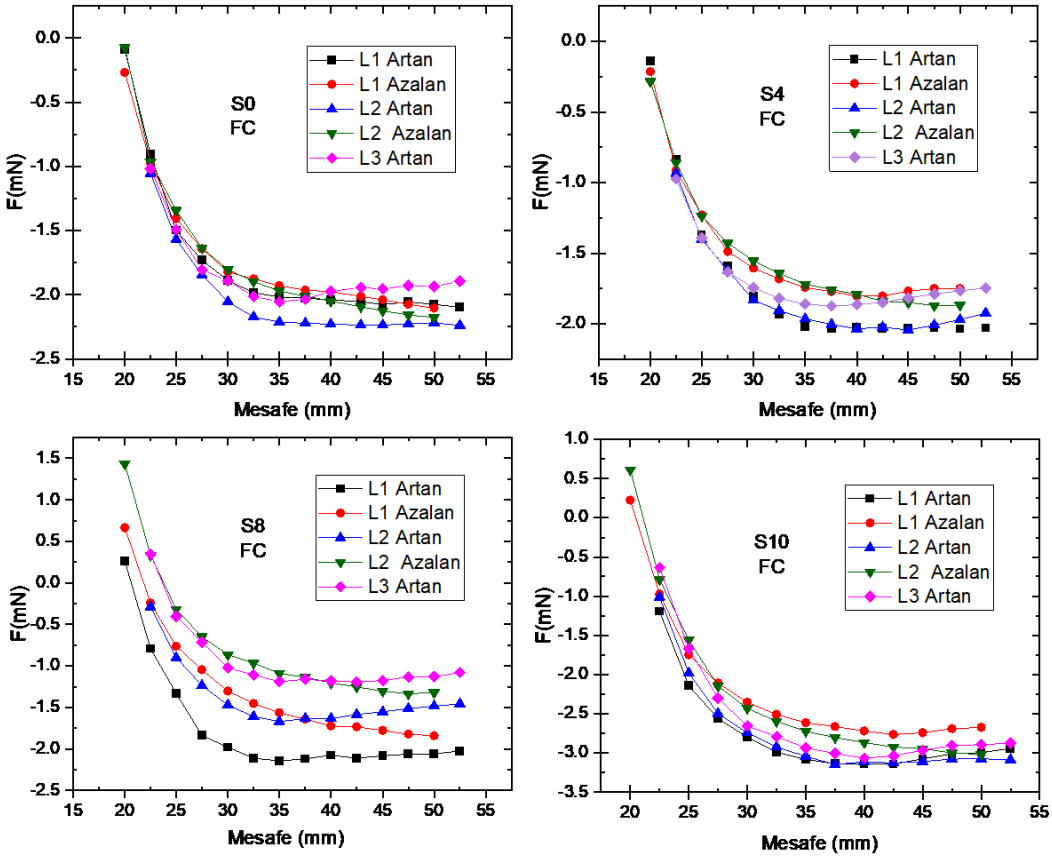
Eğriler dikkatli incelendiğinde, bütün örnekler için kuvvetin pozitiften negatif değerlere ulaştığı görülmektedir. Bu durum seramik numunelerin kalıcı mıknatıs üzerinde hem itici hem de çekici etkisinin varlığını gösterir. Ancak baskın olan çekici kuvvetin katkıyla artmış olduğu açıktır.

Baskın olan çekici kuvvet süperiletken içerisinde yeterli akı yakalama kapasitesinin oldukça güçlü olduğunun göstergesidir. Alanlı soğutma altında manyetik kaldırma kuvvetinin düşey mesafeye bağlı eğrileri için yaklaşma ve uzaklaşma eğrisi arasındaki karın bölgesi akı yakalama kapasitesinin bir ölçüsüdür. Bu da literatürde histerezis davranış olarak bilinir.

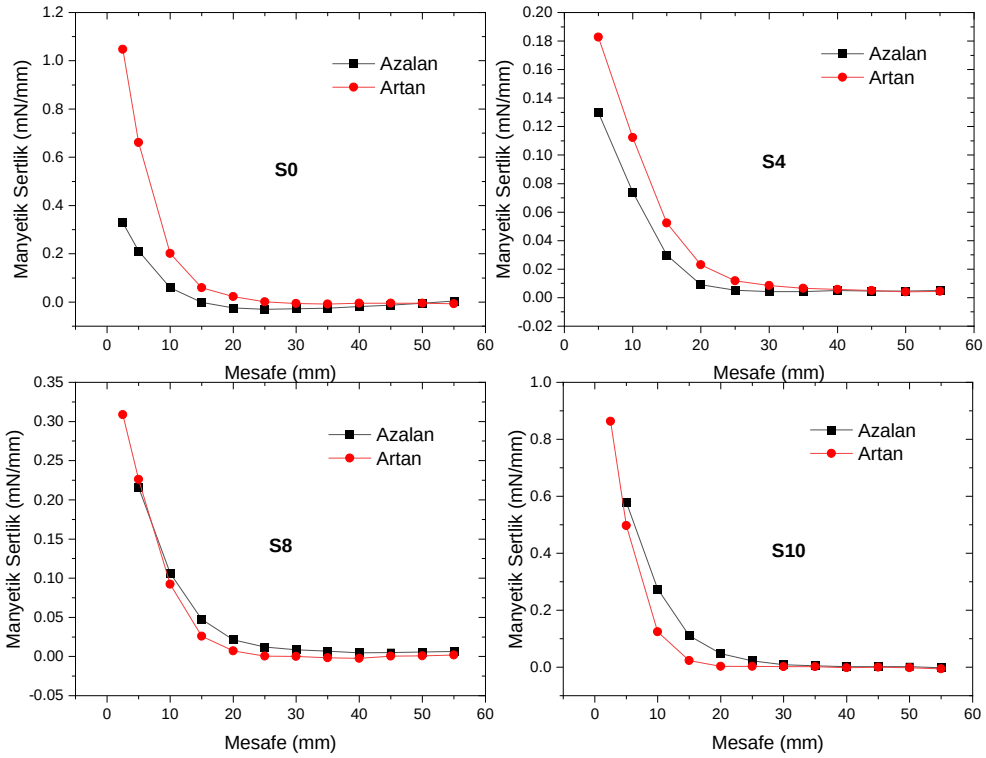


Şekil 6. Alanlı soğutma altında S0, S4, S8 ve S10 seramiklerine ait manyetik kaldırma kuvvetinin mesafeye bağlı değişimi

Şekil 7'da alanlı soğutma şartında S0, S4, S8 ve S10 seramiklerinin L1-L2-L3 şeklinde 3 döngü üzerinden alınan manyetik kaldırma kuvvetinin mesafeye bağlı değişimi görülmektedir. Her bir numune için kaldırma kuvveti kendi arasında bağımsız incelendiğinde, katkının artışıyla L1′den L3′e çekici kuvvetin azaldığı görülür. Bu da akı yakalama kapasitesinin döngüler ilerledikçe azaldığı anlamına gelir. Bean'in Kritik Durum Modeli bu kaymaları tam manasıyla açıklar.



Şekil 7. Alanlı soğutma altında S0, S4, S8 ve S10 seramiklerinin 3 döngü üzerinden kaldırma kuvvetinin mesafeye bağlı değişimi



Şekil 8. S0, S4, S8 ve S10 seramikleri için manyetik sertliğin mesafeye bağlı değişimi

En büyük çekici kuvvet S10 numunesinde 3.20 mN olarak ölçülmüştür. Buradan yola çıkarak, yüksek sıcaklık seramiklerde yapılan katkının artışı L1′den L3′ e giderken en büyük kaldırma kuvvetinin çekici yönde artışına sebep olmaktadır.

3.3 Manyetik sertlik hesaplamaları

Süperiletken numuneler ile kalıcı mıknatıslar arasındaki sistemlerde mekanik yay benzeri bir kuvvet, manyetik itme veya çekimden kaynaklanır. Bu sistemlerde ortaya çıkan manyetik sertlik olarak isimlendirilen manyetik yay sabitinin değeri değişkendir. Çünkü süperiletken kalıcı mıknatıs sisteminde manyetik kuvvetin mesafeye göre türevi olan manyetik sertlik, konuma ve diğer koşullara bağlı olarak değişkenlik gösterir. Eğer üç boyutlu dinamik bir kuvvet ölçümü yapılmış olsaydı bu durumda manyetik sertlik; $k_{zz} = -\frac{\partial F_z}{\partial z}$, $k_{xx} = -\frac{\partial F_x}{\partial x}$, $k_{zx} = -\frac{\partial F_z}{\partial x}$ şeklinde ifade edilmiş olacaktı [44]. Manyetik kaldırma kuvveti ölçümlerini tek boyutta statik olarak yaptığımız bu çalışmada kuvvetin mesafeye bağlı türevini alarak manyetik sertlik hesaplamalarını gerçekleştirdik.

Saf ve katkılı numunelerin manyetik sertliğinin mesafeye bağlı değişimini gösteren Şekil 8 incelendiğinde, seramik numunelerin hepsinde katkı artışıyla maksimum sertlik değerlerinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca, seramik malzemelerin tamamına ait grafikler incelendiğinde, 0–35 mm aralığı, seramik malzemenin mıknatısa karşı en yüksek duyarlılığı gösterdiği manyetik sertlik bölgesi olduğu tespit edilmiştir. Bu bölgenin dışına çıkıldıkça sistemin mıknatısa cevabı zayıflar, manyetik sertlik değeri düşer. Bu sonuç Maglev sistemlerinde optimum çalışma mesafesinin bu aralıkta tutulmasının gerekliliğini gösterir. Bu veri malzeme geliştirme, geometri tasarımı, soğutma sistemlerinin konumlandırılması gibi birçok tasarım parametresi üzerinde doğrudan etkilidir. Bu bölge içindeki çalışma, daha az enerji kaybı ve daha kararlı süspansiyon sağlar.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada daha önceki çalışmamızda CuO yerine farklı oranlarda nano boyutta ZnO katkılanarak katı-hal tepkime yöntemiyle sentezlenen $Sn_2Ba(Cu_{2-x}Zn_x)_2O_y$ (x=0.0, 0.4, 0.8, 1.0) seramik malzemesinin manyetik kaldırma kuvveti özellikleri incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, 470 mT yüzey alanına sahip Nd-B-Fe kalıcı mıknatıs kullanılmış, numunelerin alansız soğutma ve alan altında soğutma şartlarında kaldırma kuvveti ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, alansız soğutma şartı altında elde edilen veriler kullanılarak manyetik sertlik hesaplamaları yapılmıştır. Alansız soğutma şartı altında, seramik malzemelerin hepsi histerezis davranış göstermiştir.

Tüm numunelerin manyetik kaldırma kuvvetinin mesafeye göre değişim grafiğinden, yaklaşık 35 mm mesafeye kadar kaldırma kuvvetinde bir değişim gözlenmezken, 35-2.5 mm′lik bölgede belirgin bir değişim görülmüştür. En büyük manyetik kaldırma kuvvet değeri (F_{mak}) S0 malzemesinde deneysel eğrinin fit edilmesiyle F_z = 11.5387 mN olarak hesaplanmıştır. Tüm numunelere ait kaldırma kuvveti eğrileri incelendiğinde katkılamanın çekici kuvveti azalttığı ve itici kuvveti arttırdığı ortaya konmuştur. Katkı oranının artışı, manyetik kaldırma kuvvetine ait yaklaşma ve uzaklaşma eğrileri arasındaki bölgenin büyüklüğünde bir azalma ile sonuçlanmıştır. Bu durum, süperiletken içerisindeki akı sabitleme merkezlerinin sayısındaki azalış veya bu merkezlerin çapındaki

küçülmeden kaynaklanan zayıf akı tuzaklamasını düşündürür.

Alanlı soğutma altında, kuvvet eğrileri bütünsel olarak değerlendirildiğinde, katkılamanın hem maksimum itici kuvveti hem de maksimum çekici kuvveti artırdığı görülmüştür. İtici kuvvet maksimum 0.7 mN′a, çekici kuvvet ise maksimum 3.25 mN′a ulaşmıştır. Bütün örnekler için kaldırma kuvvet değerlerinin pozitiften negatif değerlere ulaştığı görülmektedir. Bu durum seramik numunelerin kalıcı mıknatıs üzerinde hem itici hem de çekici etkisinin varlığını gösterir. Ancak baskın olan çekici kuvvetin katkıyla artmış olduğu açıktır.

Alansız soğutma altında deneysel olarak elde edilen manyetik kaldırma kuvvetinin mesafeye göre grafiklerinden yararlanarak, teorik fit yöntemiyle bulduğumuz sonuçlar r^2 = 0.9995 uyumlulukla yapılmış olup F_0, a ve b parametreleri elde edilmiştir.

Her bir numune için kaldırma kuvveti kendi arasında bağımsız incelendiğinde, katkının artışıyla L1′den L3′e çekici kuvvetin azaldığı görülmüştür. Bu da akı yakalama kapasitesinin döngüler ilerledikçe azaldığı anlamına gelir. Bean'in Kritik Durum Modeli bu kaymaları tam manasıyla açıklar.

Elde edilen sonuçlar, ZnO katkı oranının süperiletken seramiklerin manyetik özellikleri üzerindeki etkisini ortaya koymakta ve ZnO′nun kritik manyetik parametreler üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

[1] I. A. Parinov, Microstructure and properties of high-temperature superconductors, Springer Berlin Heidelberg, Second Edition (2013).

[2] H. K. Onnes, The resistance of pure mercury at helium temperatures. Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden, 12, 1. 1911

[3] W. Meissner, and R. Ochensenfield, Ein neuer Effeckt bei Eintritt der Supraleitfaehigkeit Naturwissenschaften 21, 787, 1933.

[4] J. G. Bednorz and K. A. Muller, Possible high T_c superconductivity in the La-Ba-Cu-O system. Zeitschrift für Physik B-Condensed Matter, 64, 189-193, 1986. http://dx.doi.org/10.1007/BF01303701.

[5] J. Unsworth, J. Du, B. J. Crosby, J. C. Macfarlane, Magnetic levitation force measurement on high T_c superconducting ceramic/polymer composites, IEEE Transactions on Magnetics 29, 108-112, 1993. https://doi.org/10.1109/20.195554

[6] W. M. Yang, L. Zhou, Y. Feng, P. X. Zhang, M. Z. Wu, W. Gawalek, and P. Gornert, The effect of excess Y_2O_3 addition on the levitation force of melt processed YBCO Bulk Superconductors. Physica C: Superconductivity, 305, 269-274, 1998. https://doi.org/10.1016/S0921-4534(98)00339-6

[7] G. Z. Li, W. M. Yang, X. F. Cheng, X. D. Guo, J. Fan, A modified TSIG technique for simplifying the fabrication process of single-domain GdBCO bulks with a new kind of liquid source. Journal of Materials Science, 44, 6423-6426 2009. https://doi.org/10.1007/s10853-009-3887-8

[8] I. G. Chen, J. C. Hsu, G. Janm, C. C. Kuo, H. J. Liu, M. K. Wu, Magnetic levitation force of single grained YBCO materials. Chinese Journal of Physics. 36(2), 420-4278, 1998. https://doi.org/10.1002/chin.199843296

[9] B. Zheng, J. Zheng, D. He, Y. Ren, Z. Deng, Magnetic characteristics of permanent magnet guideways at low temperature and its effect on the levitation force of bulk YBaCuO superconductors. JALCOM. 656, 77-81, 2016. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.09.116

[10] Z. M. Zhao, J. M. Xu, X. Y. Yuan, C. P. Zhang, Levitation force of melt-textured YBCO superconductors under non-quasi-static situation. Physica C. 549, 154-159, 2018. https://doi.org/10.1016/j.physc.2018.03.011

[11] C. P. Bean, Magnetization of hard superconductors. Phys. Rev. Lett. 8, 250-253, 1962. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.8.250

[12] T. H. Johansen, Z. J. Yang, H. Bratsberg, G. Helgesen, A. T. Skjeltorp, Lateral force on a magnet placed above a planar YBa2Cu3Ox superconductor. Appl. Phys.Lett. 58, 179-181, 1991. https://doi.org/10.1063/1.104965

[13] J. C. Wei and T. J. Yang, Theoretical calculation of magnetic force for Type-II superconductor in a levitated magnetic field. Chin. J. Phys, 34, 1344-1351, 1996.

[14] X-Y Zhang, Y-H Zhou, J. Zhou, Three-dimensional measurements of forces between magnet and superconductor in a levitation system. Physica C: Superconductivity. 467, 125-129, 2007. https://doi.org/10.1016/j.physc.2007.09.010

[15] S. L. Chen, W. M. Yang, J. W. Li, X. C. Yuan, J. Ma, M. Wang, A new 3D levitation force measuring device for REBCO bulk superconductors. Physica C: Superconductivity. 496, 39-43, 2014. https://doi.org/10.1016/j.physc.2013.07.004

[16] R. Parthasarathy, V. Seshubai, Significant correlations between levitation-suspension forces and critical current densities in bulk YBCO/Ag composite superconductors fabricated by infiltration and growth processing technique. J Supercond Nov Magn 29, 1439-1447, 2016. https://doi.org/10.1007/s10948-016-3431-4

[17] B. Savaskan, E. Taylan Koparan, S. Celik, K. Ozturk, E. Yanmaz, Investigation on the levitation force behaviour of malic acid added bulk MgB_2 superconductors. Physica C: Superconductivity. 502, 63-69, 2014. https://doi.org/10.1016/j.physc.2014.04.032

[18] R. J. Adler, W. W. Anderson, Force between a superconductor and a permanent magnet due to trapped flux. J. Appl. Phys 68, 695-700, 1990. https://doi.org/10.1063/1.346800

[19] A. Cansız, Force, Stiffness and hysteresis losses in high temperature superconducting bearings. PhD Thesis,

Illinois Instıtute of Technology, Chicago, 3. (1999) https://books.google.com.tr/books?id=c-eBNwAACAAJ

[20] P. Z. Chang, F. vC. Moon, J. R. Hull, T. M. Mulcahy, Levitation force and magnetic stiffness in bulk high-temperature superconductors. J. Appl. Phys. 67, 4358-4360, 1990. https://doi.org/10.1063/1.344927

[21] J. S. Choi, S. D. Park, B. H. Jun, Y. H. Han, N. H. Jeong, B. G. Kim, J. M. Sohn, C. J. Kim, Levitation force and trapped magnetic field of multi-grain YBCO bulk superconductors. Physica C. 468, 1473–1476, 2008. https://doi.org/10.1016/j.physc.2008.05.200

[22] P. Benzi, E. Bottizzo, N. Rizzi, Oxygen determination from cell dimensions in YBCO superconductors. J. Cryst. Growth 269, 625-629, 2004. https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2004.05.082

[23] I. B. Bobylev, E. G. Gerasimov, N. A. Zyuzeva, Improvement of critical parameters of YBa2Cu3O6.9 by low temperature treatment in the presence of water vapors. Cryogenics. 72, 36–43, 2015. https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2015.08.003

[24] I-G Chen, J-C Hsu, G. Janm, C-C Kuo, H-J Liu, M.K. Wu, Magnetic levitation force of single grained YBCO materials. Chinese Journal of Physics. 36, 420-427, 1998.

[25] K. Brodt, H. Fuess, E.F. Paulus, W. Assmus, J. Kowalewski, Untwinned single crystals of the high-temperature superconductor YBa2Cu3O7-δ. Acta Crystallogr C. 46, 354-358, 1990. https://doi.org/10.1107/S0108270189006803

[26] V. Calzona, M. R. Cimberle, C. Ferdeghini, M. Putti, A. S. Siri, AC susceptibility and magnetization of high-tc superconductors: critical state model for the intergranular region. Physica C. 157, 425-430, 1989. https://doi.org/10.1016/0921-4534(89)90266-9

[27] F. P. Dahl, Kamerlingh Onnes and the Discovery of Superconductivity: The Leyden Years. 1911–1919, University of California Press. Historical Studies in the Physical Sciences. 15, 1–37, 1984. https://doi.org/10.2307/27757541

[28] B. Savaskan, M. Abdioglu, K. Ozturk, Determination of magnetic levitation force properties of bulk MgB2 for different permanent magnetic guideways in different cooling heights. Journal of Alloys and Compounds. 834, 155167, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155167

[29] F. C. Moon, K. C. Weng, P. Z. Chang, Dynamic magnetic forces in superconducting ceramics. J. Appl. Phys. 66, 5643, 1989. https://doi.org/10.1063/1.343677

[30] Y. Yeshurun, A. P. Malozemoff, A. Shaulov, Magnetic relaxation in high-temperature superconductors. Rev. Mod. Phys. 68, 911-949, 1996. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.68.911

[31] S. Büyükakkaş, Ş. Ünlüer, Effects on structural properties of doping zinc into Sn2Ba(Cu22xZnx)2Oy ceramics, Indian Journal of Physics, 2025. https://doi.org/10.1007/s12648-025-03551-x

[32] İ. Karaca, N. Şimşek, S. Özen, M. T. Güler, Infiltration effects on (RE) 123 superconductors. Chinese Journal of Physics. 59, 556-566, 2019. https://doi.org/10.1016/j.cjph.2019.03.016

[33] M. T. Güler, Nano bor katkısının yüksek sıcaklık süperiletken seramiklere etkilerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Niğde, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2021.

[34] K. M. Kim, S. D. Park, S. H. Jun, T. K. Ko, C. J. Kim Simple die pressing for making artificial holes in single-grain Gd1.5Ba2Cu3O7−y superconductors. Supercond Sci Technol., 25:105016, 2012. https://doi.org/10.1088/0953-2048/25/10/1-5016

[35] W. M. Yang, X. X. Chao, X. B. Bian, P. Liu, Y. Feng, P. X. Zhang, L. Zhou, The effect of magnet size on the levitation forces and attractive force of single-domain YBCO bulk superconductor. Supercond Sci Technol 16:789 (2003) http://dx.doi.org/10.1088/0953-2048/16/7/308

[36] M. Murakami, T. Oyama, H. Fujimoto, T. Taguchi, S. Gotoh, Y. Shiohara, N. Koshizuka, S. Tanaka, Large levitation force due to flux pinning in YBaCuO superconductors fabricated by melt-powder-melt-growth process. Jpn J. Appl Phys 29(11):L1991, 1990.

[37] F. C. Moon, Superconducting Levitation, 2nd edition, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2004.

[38] W. M. Yang, L. Zhou, Y. Feng, P. X. Zhang, J. R. Wang, C. P. Zhang, Z. M. Yu, X. D. Tang, W. Wei, The effect of magnet configurations on the levitation force of melt processed YBCO bulk superconductors, Physica C 354, 5-12, 2001.

[39] S. B. Guner, S. Celik, M. Tomakin, The investigation of magnetic levitation performances of single grain YBCO at different temperatures, Journal of Alloys and Compounds 0925-8388, 30572-8, 2017.

[40] Y-N Wang, W-M Yang, P-T Yang, C-Y Zhang, J-L Chen, L-J Zhang, L.Chen, Influence of trapped field on the levitation force of SmBCO bulk superconductor, Physica C: Sup. and its App. 542, 28–33, 2017.

[41] İ. Karaca, Characterization of a cylindrical superconductor disk prepared by the wet technique with microstructure analysis and levitation force measurements using a permanent magnet, Chınese Journal Of Physıcs 47, 5, (2008)

[42] Kim, C-J., Superconductor Levitation Concepts and Experiments, Springer, Singapore, 2019.

[43] M. Murakami, Melt Processed High-Temperature Superconductors. World Scientific, Singapore, 1992. 9789814335898_fmatter (worldscientific.com).

[44] O. Ozogul, Calculation of Levitation Force Using a Critical-State Model. J. Supercond. Nov. Magn., 25, 221-225, 2012. https://doi.org/10.1007/s10948-011-1281-7.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 1135-1142

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Sentetik vollastonit katkısının yüksek plastisiteli kil zeminlerin dayanım ve mikroyapı özelliklerine etkisi

Effect of synthetic wollastonite on the strength and microstructural properties of high-plasticity clay soils

Firdevs Uysal[1], Esra Tatlıoğlu[2,*], Hasan Erhan Yücel[3]

[1,2] *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye*
[3] *Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, 31060, Hatay, Türkiye*

Öz

Bu çalışmada, yüksek plastisiteli kil (CH) zeminlerin sentetik vollastonit (SV) katkısı ile stabilize edilerek mühendislik özelliklerindeki değişim deneysel olarak araştırılmıştır. Stabilizasyon amacıyla laboratuvar ortamında %25 Na-bentonit ve %75 kaolinit içeren yapay zemin hazırlanmış; %0, %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında SV katkısı ilave edilerek zemin numuneleri oluşturulmuştur. Zeminlerin kıvam limitleri ve serbest basınç dayanımı (UCS) belirlenmiş, katkının etkisi karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca katkının mikroyapısal etkilerini incelemek amacıyla SEM ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel bulgular, SV katkısının plastisite indeksinde %33 oranında azalma sağladığını, UCS değerlerinde ise katkısız zemine göre %203'e varan artışa neden olduğunu göstermektedir. Mikroyapı analizleri, sentetik vollastonitin fiziksel özellikleriyle zemin davranışını olumlu yönde etkileyerek stabilize edici bir katkı malzemesi olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Atterberg limitleri, SEM-EDS, Sentetik vollastonit, Serbest basınç dayanımı, Yüksek plastisiteli kil, Zemin stabilizasyonu

Abstract

In this study, the effects of synthetic wollastonite (SV) on the engineering behavior of high-plasticity clay (CH) soils were experimentally investigated. For stabilization purposes, an artificial clayey soil composed of 25% Na-bentonite and 75% kaolinite was prepared in the laboratory, and synthetic wollastonite was added at varying dosages of 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, and 10% by weight. Atterberg limit tests and unconfined compressive strength (UCS) tests were conducted to evaluate the impact of SV addition. Furthermore, SEM and EDS analyses were performed to assess microstructural changes in the stabilized soils. The experimental results indicated that the plasticity index decreased by up to 33%, while UCS values increased by approximately 203% compared to the untreated soil. Microstructural analyses revealed that synthetic wollastonite positively influences the behavior of the soil through its physical characteristics, indicating its potential as an effective stabilizing additive.

Keywords: Atterberg limits, SEM-EDS, Synthetic wollastonite, Unconfined compressive strength, High plasticity clay, Soil stabilization

1 Giriş

Zemin, mühendislik yapılarının güvenli, dayanıklı ve ekonomik bir şekilde inşa edilebilmesi açısından hem doğal bir yapı malzemesi hem de temel taşıyıcı ortam olarak kritik öneme sahiptir. Yapıların performansı büyük ölçüde oturduğu zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerine bağlıdır. Ancak çoğu durumda, zeminler doğal halleriyle bu yapısal gereksinimleri karşılamakta yetersiz kalmakta ve bu durum çeşitli geoteknik sorunlara yol açabilmektedir [1]. Bu bağlamda, zemin davranışının doğru şekilde analiz edilmesi ve gerektiğinde uygun mühendislik yöntemleriyle iyileştirilmesi, geoteknik mühendisliğinin temel çalışma alanlarından birini oluşturmaktadır. Günümüzde zemin iyileştirme teknikleri, doğal zeminlerin taşıma gücünü artırmak, oturma miktarlarını azaltmak ve yapı ömrünü uzatmak amacıyla yaygın biçimde uygulanmaktadır ve modern inşaat uygulamalarının vazgeçilmez bir bileşeni haline gelmiştir [2,3]. Bu kapsamda uygulanan başlıca iyileştirme yöntemleri; mekanik sıkıştırma, geosentetik donatılarla güçlendirme, kolon tipi iyileştirmeler (taş kolon ve jet grout uygulamaları vb.), elektro-osmotik yöntemler ve kimyasal stabilizasyon gibi teknikleri içermektedir [4]. Bu yöntemlerin seçimi; zeminin özelliklerine, mühendislik yapısının gereksinimlerine, maliyet-etkinlik analizlerine ve çevresel koşullara bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [5]. Bu iyileştirme teknikleri içerisinde kimyasal stabilizasyon, özellikle ince daneli ve zayıf mühendislik özelliklerine sahip zeminlerin performansını artırmada etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır [6]. Bu yöntemde çimento, kireç, uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu gibi bağlayıcı malzemeler zemine ilave edilerek, zamanla oluşan puzolanik ve/veya hidrolik reaksiyonlar sayesinde zemin matrisinde daha kararlı ve dayanıklı bir yapı elde edilmektedir [7]. Böylece, zeminin taşıma gücü artırılmakta, oturma potansiyeli azaltılmakta ve çevresel etkiler karşısında daha dirençli bir zemin yapısı oluşturulmaktadır [8,9].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: esratatlioglu@ohu.edu.tr (E. Tatlıoğlu)
Geliş / Received: 17.06.2025 Kabul / Accepted: 04.07.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1721159

Son yıllarda, geleneksel bağlayıcı malzemelerin (çimento, kireç, uçucu kül vb.) çevresel etkileri ve sürdürülebilirlik kaygıları, araştırmacıları daha çevre dostu ve yenilikçi alternatif arayışlarına yönlendirmiştir [10]. Bu doğrultuda, doğal ya da sentetik kökenli alternatif katkı malzemelerinin zemin stabilizasyonunda kullanımına yönelik çalışmalar giderek artmakta ve bu alanda dikkat çeken bir araştırma eğilimi oluşmaktadır [11,12]. Bu kapsamda öne çıkan mineral katkılardan biri de vollastonittir. Geleneksel olarak seramik ve boya sanayilerinde kullanılan bu mineral, son yıllarda zemin mühendisliğinde de araştırma konusu haline gelmiştir [13].

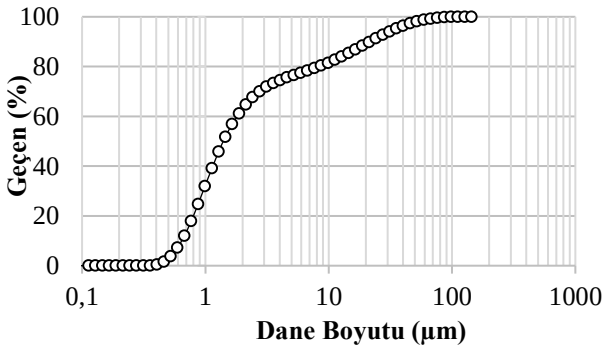
Kalsiyum silikat esaslı kimyasal yapısı sayesinde bağlayıcı nitelikler gösterebilen vollastonit, zemin stabilizasyonunda potansiyel bir iyileştirici olarak değerlendirilmektedir [14]. Vollastonit, düşük toksisite, biyolojik olarak parçalanabilirlik ve yüksek kimyasal dayanıklılık gibi çevresel ve mühendislik açısından avantajlı özelliklere sahiptir [15,16]. Vollastonit, doğal yataklardan elde edilebilmenin yanı sıra, endüstriyel atıkların kullanılması ile laboratuvar ortamında sentetik olarak da üretilebilmektedir [17-19]. Doğal vollastonit kaynaklarının kısıtlı olması, sentetik vollastoniti çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik açıdan önemli bir alternatif haline getirirken, bu malzemenin zeminlerin mühendislik davranışları üzerindeki etkilerine dair çalışmaların literatürde sınırlı olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, doğal vollastonit katkılı zemin stabilizasyonu üzerine yapılan çalışmalar, bu malzemenin zemin özelliklerini iyileştirme potansiyelini ortaya koymaktadır [13,20-22]. Mohanalakshmi vd. [13], vollastonit katkısının zeminler üzerindeki etkilerini Standart Proktor sıkıştırma ve Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) testleri gibi çeşitli laboratuvar deneyleriyle incelemiş; %15'e kadar olan katkı oranlarında zemin dayanımında belirgin artışlar gözlemlerken, bu oranın üzerindeki katkılarda artışın azaldığını belirtmiştir. Benzer şekilde, Nikhil vd. [20], doğal vollastonit kullanarak şişen zeminlerin stabilizasyonuna yönelik yaptıkları çalışmada, katkı oranındaki artışla birlikte serbest basınç dayanımı değerlerinin %12.5'e kadar yükseldiğini, ancak %15 katkı oranından itibaren azalmaya başladığını tespit etmişlerdir. Aynı çalışmada, maksimum kuru yoğunluğun azaldığı, optimum su içeriğinin ise arttığı belirtilmiş; bu durum, katkı maddesinin zemin malzemesinden daha yüksek özgül ağırlığa sahip olmasıyla açıklanmıştır. Kumar vd. [21], vollastonit tozunu parçalanmış plastik atıklarla birlikte kullanarak karma katkı sistemlerinin etkisini incelemiştir. %0.5 oranında plastik ve %5, %10, %15 ile %20 oranlarında vollastonit tozu içeren karışımlar üzerinde yapılan deneyler sonucunda; katkı oranı arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlık ve CBR değerlerinde artış, optimum su içeriğinde ise azalma gözlemlenmiştir. Çalışmada en etkili katkı oranı %20 olarak belirlenmiştir. Pouraziz vd. [22], örselenmiş kil zemine %2, %4, %8 ve %10 oranlarında vollastonit ilave ederek gerçekleştirdikleri çalışmada, vollastonitin zemin davranışları üzerindeki en etkili katkı oranının %8 olduğunu ortaya koymuşlardır.

Bu çalışmada, laboratuvar ortamında hazırlanan yüksek plastisiteli kil (CH) zemine farklı oranlarda (%0, %2, %4, %6, %8 ve %10) sentetik vollastonit (SV) katkısı ilave edilerek zemin stabilizasyonu gerçekleştirilmiştir. Stabilizasyonun zeminin mühendislik özellikleri üzerindeki etkileri; Atterberg limitleri, serbest basınç dayanımı (UCS) ve mikroyapı karakterizasyonuna yönelik SEM–EDS analizleri ile değerlendirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, SV katkısının hem mekanik hem de mikroyapısal düzeyde zemine sağladığı iyileştirmeleri ortaya koymaktır.

2 Malzeme özellikleri

2.1 Zemin özellikleri

Bu çalışmada, SV katkısı ile stabilize edilecek ince daneli zemin ağırlıkça %25 oranında sodyum bentonit (Na-bentonit) ve %75 oranında kaolinit içerecek şekilde yapay olarak hazırlanmıştır. Bu zeminin yapay olarak hazırlanmasındaki amaç; zayıf zemin davranışını temsil eden, homojen ve tekrarlanabilir özelliklere sahip bir numune elde ederek katkı olarak kullanılan vollastonitin etkilerini kontrollü koşullar altında değerlendirmektir. İnce daneli zeminin likit limit değeri (LL) BS 1377-2 [23] standardına göre %106, plastik limit değeri (PL) ASTM D 4318 [24] standardına göre %24 olarak tespit edilerek plastisite indisi (PI) %82 olarak tespit edilmiştir. Bu zemin, USCS'ye göre CH olarak sınıflandırılmıştır. Zeminin dane çapı dağılımı, lazer kırınım yöntemi ile tespit edilerek Şekil 1'de verilmiştir. Ayrıca, Na-bentonit, kaolinit ve yapay olarak oluşturulan zeminin kimyasal içeriğinin tespiti için XRF (X-Ray Fluorescence) analizleri yapılmıştır (Tablo 1).



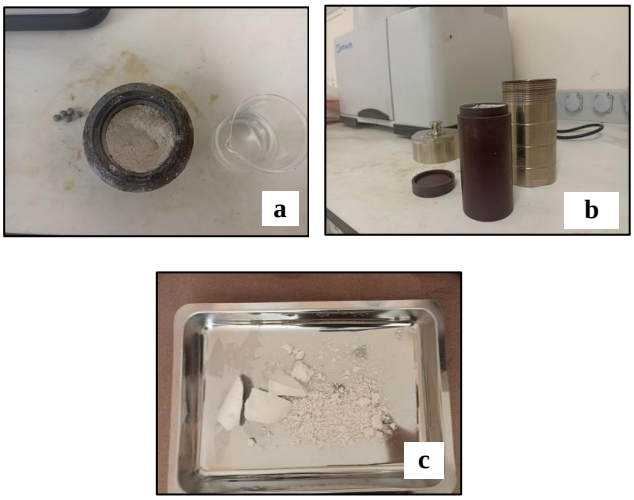
Şekil 1. Zeminin dane çapı dağılımı

Tablo 1. Zemin ve bileşenlerinin kimyasal içeriği

Oksit	Na-bentonit (%)	Kaolinit (%)	Zemin (%)
SiO_2	63.710	79.620	76.190
Al_2O_3	18.820	15.880	16.210
Fe_2O_3	4.910	0.645	1.620
CaO	4.340	1.795	2.530
MgO	2.205	0.318	0.720
K_2O	1.375	0.397	0.659
TiO_2	0.439	0.287	0.345
SO_3	0.053	0.149	0.137
Mn_3O_4	0.129	0.006	0.041
Na_2O	2.799	0.062	0.640
BaO	0.091	0.081	0.080
P_2O_5	0.190	0.083	0.108
SrO	0.040	0.035	0.120

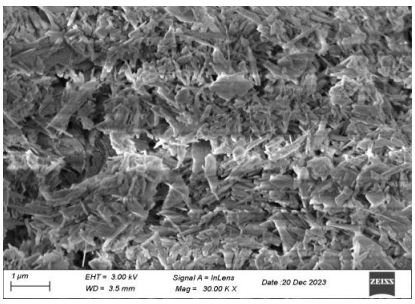
2.2 *Sentetik vollastonit üretimi ve özellikleri*

Sentetik vollastonit üretimi üç temel aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar, mekanokimyasal süreç, hidrotermal süreç ve sinterleme süreci olarak adlandırılmıştır. Üretimde ham madde olarak sönmemiş kireç (CaO) ve kuvars kumu (SiO_2) kullanılmıştır. Öncelikle, CaO ve SiO_2 mol ağırlıklarına göre 1:1 mol oranında olacak şekilde katı malzeme ve su/katı oranı 1 olacak şekilde saf su ile Şekil 2a'da görüldüğü gibi bilyalı değirmenin haznesine yerleştirilmiştir. Bilyalı değirmen 30 dakika boyunca 250 rpm hızda çalıştırılarak homojen bir karışım elde edilmiştir. Üretim aşamasının bu kısmı mekanokimyasal süreç olarak adlandırılmıştır. Bu aşamadan sonra elde edilen karışım Şekil 2b'de görüldüğü gibi kahverengi bir teflonun içerisine alınarak teflon çelik otoklavın içerisine yerleştirilmiştir. Bu otoklav, 2 gün boyunca 200°C'de bir fırında bekletilmiştir. Hidrotermal süreç olarak açıklanan bu aşamada otoklav tekniği, nem, basınç ve sıcaklıkla daha iyi bir kristal yapı oluşumunu sağlamaktadır. 48 saatin sonunda, otoklav fırından çıkarılarak oda sıcaklığına ulaşıncaya kadar dışarıda tutulmuştur. Otoklavdan çıkarılan numune, Şekil 2c'de gösterilen tobermorit mineralidir. Elde edilen tobermorit, halkalı değirmende öğütülerek 425µm kare gözlü 40 numaralı elekten elenmiştir. Eleme işleminden sonra elde edilen malzeme, 1000°C'de 1 saat boyunca yüksek sıcaklık fırınında bekletilerek sinterleme süreci tamamlanmıştır. Sinterleme sonrasında SV minerali ($CaSiO_3$) elde edilmiştir.



Şekil 2. Sentetik vollastonitin üretim prosedürü

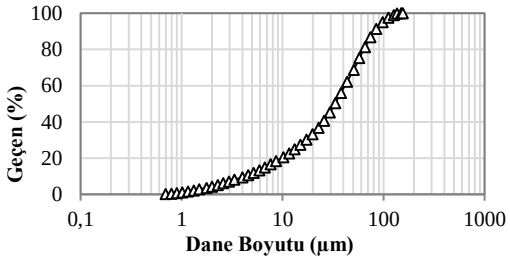
SV üretim prosedüründeki süre ve sıcaklıklar belirlenirken öncelikle farklı değerler seçilmiş ve deneme üretimleri yapılarak elde edilen sentetik vollastonitler incelenmiştir. Örneğin, hidrotermal süreç 1 gün, 2 gün ve 3 gün olarak uygulanmış, ayrıca sinterleme işlemindeki sıcaklık 1000°C, 1100°C ve 1200°C olarak denenmiştir. Elde edilen bütün SV'ler SEM analizine tabi tutulup en yoğun ve en belirgin iğnemsi parçacık yapısına sahip olan SV prosedürü deneylerde kullanılacak olan SV'nin üretiminde kullanılmıştır. Elde edilen SV mineraline XRF, SEM ve dane boyut dağılımı analizleri yapılmıştır. XRF analizi neticesinde üretilen SV'nin CaO ve SiO_2 içeriğinin sırasıyla %44.8 ve %50.9 olduğu belirlenmiştir. Üretilen SV'nin SEM analizi sonucu alınan görüntüsü Şekil 3'te görülmekte olup, buna göre elde edilen SV'nin iğnemsi parçacık yapısına sahip olduğu kanıtlanmıştır. Son olarak, yapılan dane boyut dağılımı analizi Şekil 4'te verilmiştir. Bu analiz sonucuna göre SV'nin tane boyutunun yaklaşık 0-150µm seviyesinde olduğu bulunmuştur.



Şekil 3. Sentetik vollastonitin SEM görüntüsü

3 Deneysel çalışmalar ve sonuçları

Bu çalışmada, laboratuvar ortamında sentetik olarak hazırlanan yüksek plastisiteli kil (CH) zemine, farklı oranlarda (%0, %2, %4, %6, %8 ve %10) SV katkısı ilave edilerek stabilize edilmiş zemin numuneleri hazırlanmıştır. Deneysel programın ilk aşamasında, katkı uygulanmış zeminlerin temel mühendislik özellikleri incelenmiştir. İkinci aşamada, serbest basınç deneyi için üretilecek numunelerde kullanılacak optimum su muhtevası, Standart Proktor deneyi ile belirlenmiştir. Son aşamada ise, elde edilen optimum su içeriği kullanılarak farklı vollastonit oranlarında hazırlanan zemin numunelerine serbest basınç deneyleri uygulanmış ve bu sayede katkı oranlarının serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.



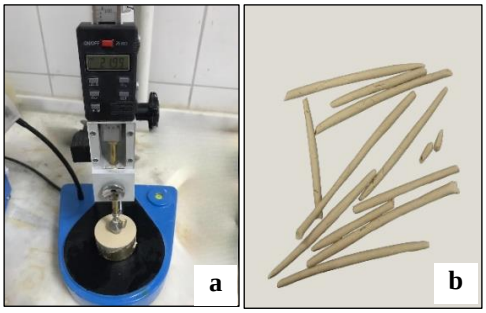
Şekil 4. Sentetik vollastonitin dane boyutu dağılımı

3.1 *Deneysel çalışmalar*

Kıvam limit deneyleri, vollastonit katkılı CH zemin numunelerinin likit limit ve plastik limit değerlerinin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Numunelerin likit limit değerleri BS 1377-2 [23] standartlarına uygun olarak yarı otomatik düşen koni deneyi ile elde edilmiştir (Şekil 5a). Plastik limit deneyi, likit limit için hazırlanan numunelerden bir miktar alınarak, ASTM D 4318 [24] standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 5b).

Standart Proktor deneyi, CH zeminin optimum su içeriği ile maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinin tespit edilmesi amacıyla yapılmıştır. Deney ASTM D698-78A [25] standardına uygun olarak otomatik proktor sıkıştırıcısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 6). Kompaksiyon

deneyi sonucuna göre yapay zeminin optimum su içeriği (w_{opt}) %32, maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri (γ_{kmaks}) 14,25 kN/m^3 olarak elde edilmiştir.

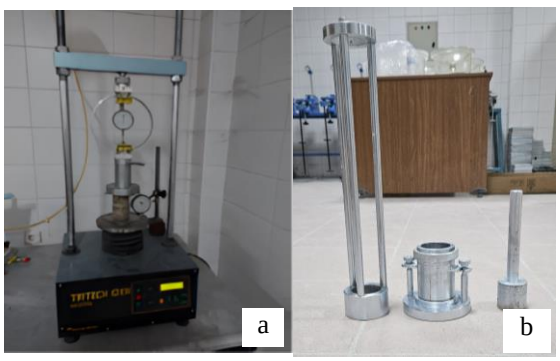


Şekil 5. Kıvam limitleri deneyleri; düşen koni deneyi (a), plastik limit deneyi (b)

Şekil 6. Otomatik proktor sıkıştırıcısı

Serbest basınç deneyleri (UCS) zemin stabilizasyon performansının araştırılmasında kullanılan en yaygın deneylerdendir. Bu çalışmada yapılan UCS deneyleri ASTM D 2166 [26] standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 7a).

Deney numuneleri, önceki aşamada standart proktor deneyleri ile elde edilen w_{opt} kullanılarak γ_k elde edilecek şekilde hazırlanmıştır. Numuneler içi yağlanmış, 50mm çap ve 100mm yüksekliğe sahip silindirik rijit mold içinde hazırlanmıştır (Şekil 7b). Numuneler üç tabaka olacak şekilde, ağırlığın sabit yükseklikten düşürülmesi ile sıkıştırılmıştır.



Şekil 7. Serbest basınç deneyi (a); numune hazırlama kalıbı (b)

3.2 Deney sonuçları

Kıvam limitleri deneyleri

Zeminin plastisite özelliklerindeki değişimi değerlendirmek amacıyla, Atterberg limitleri yapılarak likit limit ve plastisite indeksi (PI) değerleri belirlenmiş ve elde edilen veriler plastisite kartı üzerinde gösterilmiştir (Şekil 8).

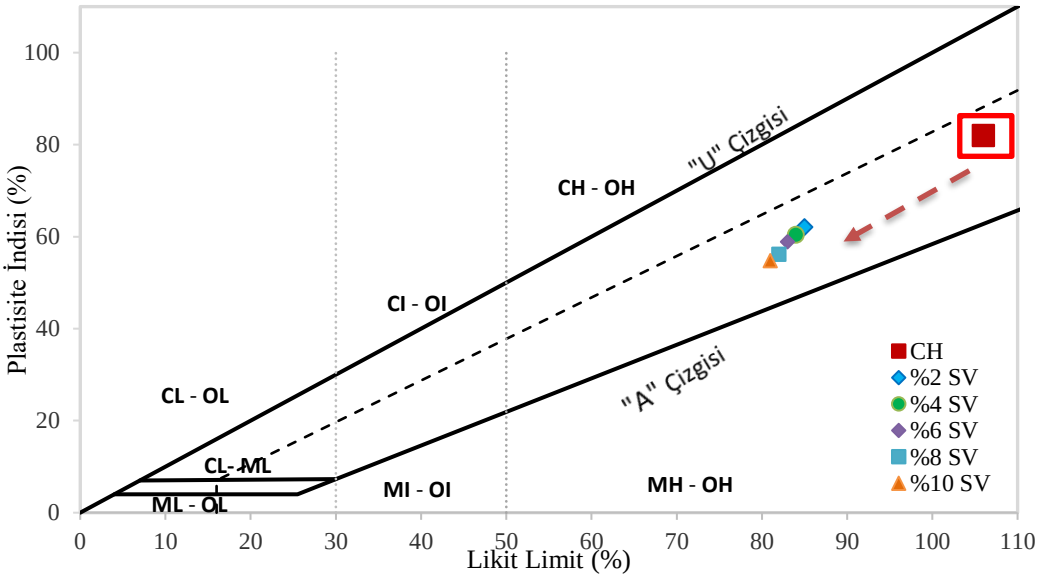
Bu grafik, vollastonit katkısının farklı oranlarda (%0, %2, %4, %6, %8 ve %10) ilave edildiği zemin karışımları üzerinde yapılan kıvam limitleri deneyleri sonucunda elde edilmiştir. Katkı oranlarına bağlı olarak zeminin kıvam sınırlarında meydana gelen değişimler değerlendirilmiş, katkı maddesinin plastisite davranışı üzerindeki etkisi grafiksel olarak ortaya konmuştur. Böylece, vollastonit ilavesinin zeminin mühendislik sınıfı üzerindeki etkisi görsel olarak analiz edilmiştir.

Yapay olarak oluşturulan zeminin, plastisite kartında yüksek plastisiteli kil (CH) sınıfında yer aldığı görülmektedir. Vollastonit katkı oranının %2'den %10'a kadar artırılmasıyla birlikte, zemin örneklerinin plastisite özelliklerinde belirgin değişimler meydana gelmiştir. Katkı oranındaki artışa paralel olarak plastisite indeksi değerlerinde azalma yaşanmış, likit limit değerleri ise yüksek seviyelerde kalmaya devam etmiştir. Bu durum, katkı maddesinin killi matris içerisindeki suyun dağılımını etkileyerek zeminin plastik davranışını sınırlandırdığını göstermektedir. Her ne kadar tüm katkı oranlarında zemin CH sınıfı içerisinde yer almaya devam etse de, özellikle %10 katkı oranında plastisite indeksinin "A" çizgisine yaklaşması, vollastonit katkısının zeminin kıvam limitleri üzerindeki olumlu etkisini ortaya koymaktadır.

Serbest basınç deneyleri

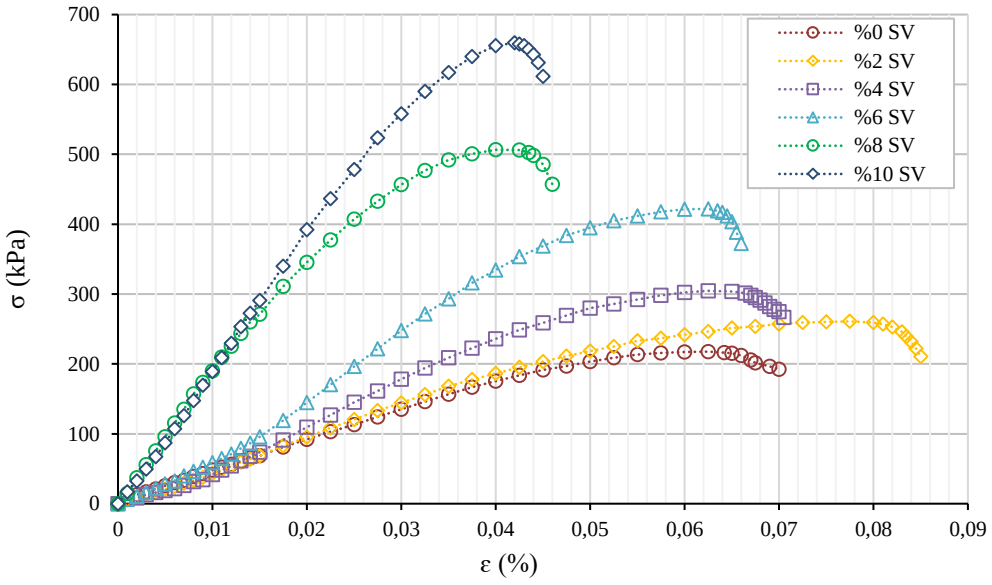
VS katkısının zeminlerin dayanım özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, katkı oranları %2'den %10'a kadar değişen CH tipi zemin numuneleri üzerinde UCS deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler, vollastonit katkısının CH sınıfı zeminlerin dayanım özelliklerini anlamlı düzeyde artırdığını göstermekte; katkısız numunelere kıyasla, katkı uygulanan zeminlerde hem gerilme dayanımı hem de deformasyon kapasitesinde dikkate değer gelişmeler sağlandığı anlaşılmaktadır (Şekil 9). Katkısız referans numunenin serbest basınç dayanımı 217.63kPa bulunmuştur. Katkı oranı arttıkça, eksensel dayanım değerlerinde anlamlı bir artış meydana gelmiştir.

Özellikle %6 ve %8 vollastonit katkı oranlarında, dayanımın sırasıyla 421,9kPa ve 506.48kPa'ya yükseldiği görülmektedir. Bu oranlarda dayanımın yanı sıra şekil değiştirme kapasitesinde de dikkate değer bir artış sağlanmıştır. En yüksek değer ise %10 vollastonit katkısı ile sağlanmış olup, serbest basınç dayanımı 659.58kPa olarak tespit edilmiştir; bu da katkısız numuneye kıyasla %200'e yakın bir artışa karşılık gelmektedir.



Şekil 8. Vollastonit katkılı zeminlerin plastisite diyagramı üzerindeki dağılımı

Eğrilerin şekil değiştirmeleri ve tepe noktalarının yerleri, katkı oranı arttıkça zemin davranışında bir miktar daha kırılgan ve daha ani dayanım kaybı yaşanabileceğine işaret etmektedir. Özellikle %10 katkılı karışımda eğrinin dik olması, yüksek katkı oranlarının deformasyon sünekliğini sınırlayabileceğini düşündürmektedir. Bu eğilim, literatürde doğal vollastonit katkı kullanılan çalışmalar ile büyük ölçüde örtüşmektedir. Mohanalakshmi vd. [13] ve Nikhil vd. [20], vollastonit katkısının zemin stabilizasyonundaki etkinliğinin genellikle %10–15 aralığında olduğunu; ancak bu seviyenin üzerindeki katkı oranlarında performansın doygunlaştığını veya azalmaya başladığını belirtmişlerdir. Benzer şekilde, Pouraziz vd. [22] de %8 oranındaki katkının, zeminin plastisite ve dayanım özellikleri açısından optimum seviye olduğunu vurgulamıştır. Bu çalışmada elde edilen bulgular da literatürle uyumlu olup, özellikle yüksek katkı oranlarında (örneğin %10) eksensel dayanım artsa da, eğrinin dik formu deformasyon kapasitesinde azalmaya ve kırılgan davranışa işaret etmektedir. Bu durum, katkı oranı ile dayanım arasındaki ilişkinin doğrusal olmadığını göstermekte ve stabilizasyon performansının yalnızca maksimum dayanım üzerinden değil, aynı zamanda süneklik, şekil değiştirme kapasitesi ve kırılma davranışı gibi parametrelerle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, vollastonit katkısının CH tipi zeminlerde %6–%10 katkı aralığında optimum stabilizasyon sağladığı; bu oranların hem dayanım artışı hem de işlenebilirlik ve deformasyon davranışında anlamlı iyileşmeler oluşturduğu sonucuna varılabilir.

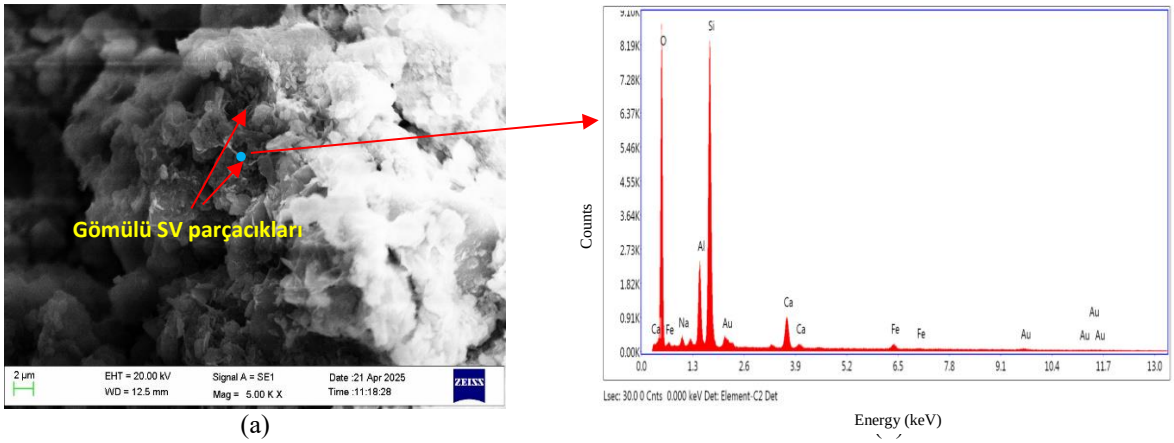


Şekil 9. Farklı vollastonit oranlarında stabilize edilen zeminlerin gerilme–şekil değiştirme davranışı

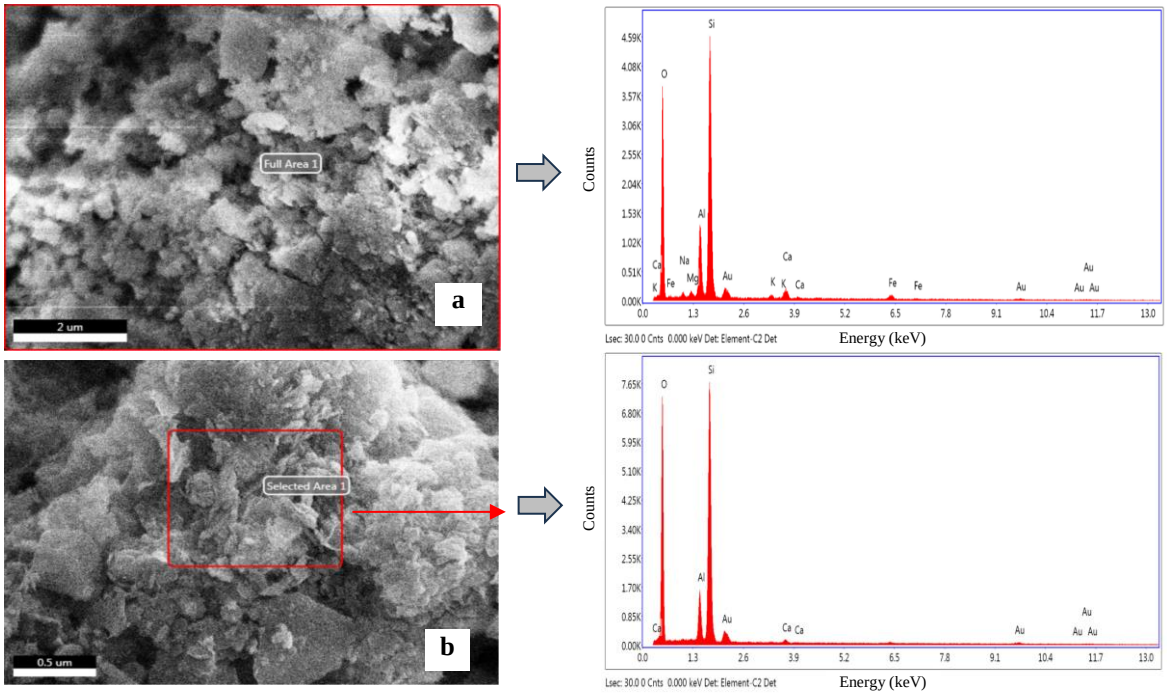
Mikro yapıdaki değişimin araştırılması

İnert yapıya sahip olan sentetik vollastonit karışımlarda iğnemsi parçacık yapısı sayesinde mikro lif gibi davranmaktadır ve bu sayede karışımların mekanik özelliklerinde belli ölçüde iyileştirme sağladığı bilinmektedir [18, 27, 28]. Şekil 10'da görülen SEM-EDAX analizi sonucu incelendiğinde gömülü halde mevcut olan sentetik vollastonik parçacıkları görülmektedir. Bu parçacıklar, karakteristik iğnemsi ve inert yapılarıyla zemin içinde mikro lifler gibi davranmakta ve matrise mekanik bağ kuvveti sağlamaktadır. SEM görüntüsüne eşlik eden EDS spektrumunda ise belirgin silisyum (Si) ve kalsiyum (Ca) piklerinin varlığı, SV parçacıklarının kimyasal bileşimini doğrulamakta ve bu katkının zeminle fiziksel teması sayesinde olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, SV'nin stabilize zemine katkısının fiziksel dolgu sağlamakla ve mikrolif gibi davranmasıyla sağladığını göstermektedir.

Şekil 11'de kontrol karışımına ve %8 oranında SV katkısı içeren stabilize zemine ait SEM görüntüsü ve ilgili bölgenin EDS analizi sunulmaktadır. SEM görüntüsünde, SV katkısının zemin matrisi içerisinde yoğunlaştığı bölgeler belirgin şekilde görülmekte olup, bu bölgelerdeki iğnemsi yapılar SV'nin karakteristik morfolojisine işaret etmektedir. Bu yapı, zemin matrisine daha fazla temas yüzeyi sunarak mikro mekanik kilitlenmeyi artırmakta ve böylece zemin-SV arayüzeyindeki bağ kuvvetinin gelişimine katkı sağlamaktadır.



Şekil. 10 Gömülü SV parçacıklarının SEM görüntüsü (a), ilgili noktanın EDS spektrumu (b)



Şekil. 11 Mikroyapı ve EDS analizi: kontrol numunesi (a); %8 SV katkılı stabilize zemin (b)

Gözlemlenen homojen dağılım, SV parçacıklarının karışım içerisinde iyi bir şekilde yayılmış olduğunu göstermektedir. EDS analizi, bu gözlemleri kimyasal düzeyde desteklemektedir. Özellikle %8 oranında SV katkısı içeren stabilize zemine ait EDS analizindeki silisyum (Si) ve kalsiyum (Ca) elementlerine ait piklerin, kontrol karışımına kıyasla belirgin şekilde artmış olması, katkı miktarındaki artışın mikroyapıdaki kimyasal içeriği doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır. SV katkı oranının artmasıyla Si ve Ca konsantrasyonlarındaki yükselme, SV'nin inert yapısının stabilize zemin içerisindeki etkinliğini artırdığına işaret etmekte; bu durum, mekanik özelliklerde gözlenen iyileşmelerin temel nedenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, laboratuvar ortamında oluşturulan yüksek plastisiteli CH tipi bir zemin, farklı oranlarda (%0, %2, %4, %6, %8 ve %10) SV katkısı ile stabilize edilerek, zemin özelliklerinde meydana gelen değişimler sistematik olarak incelenmiştir. Kıvam limitleri, kompaksiyon ve serbest basınç dayanımı gibi temel deneylerin yanı sıra SEM ve EDS analizleriyle mikroyapısal değişimler de değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, SV katkısının hem mekanik hem de mikroyapısal düzeyde zeminin performansını iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Çalışma sonucunda ulaşılan başlıca bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- SV katkısı ile plastisite özellikleri önemli ölçüde değişmiş, katkı oranının artmasıyla birlikte plastisite indisi (PI) %33'e varan oranda azalmıştır. Bu durum, zeminin daha az şekil değiştiren ve daha kararlı bir yapı kazandığını göstermektedir.
- Katkının en yüksek olduğu %10 SV oranında, likit limit değeri katkısız zemine göre %23.5 oranında düşüş göstermiştir; buna karşılık plastik limitin belirli oranlardan sonra artış eğilimine girmesi, SV katkısının zeminin kıvam davranışında olumlu etkiler yarattığını ortaya koymuştur.
- Serbest basınç dayanımı (UCS) değerleri, katkı miktarına bağlı olarak belirgin şekilde artmış; katkısız zemin 217.63 kPa dayanım gösterirken, %10 SV katkılı numunede bu değer 659.58 kPa olarak ölçülmüş ve yaklaşık %203 oranında artış elde edilmiştir.
- Vollastonit katkısı, zeminlerin dayanım ve şekil değiştirme özelliklerinde genel bir iyileşme sağlarken; katkı oranı arttıkça bazı numunelerde kırılgan davranış eğiliminin artması, yüksek oranlarda ani dayanım kayıplarının oluşabileceğini ortaya koymaktadır.
- SEM görüntüleri, SV'nin iğnemsi morfolojisi sayesinde mikro lif gibi davrandığını ve çatlak ilerlemesini sınırladığını göstermiştir.
- SV'nin doğal kaynaklarının sınırlı olması, laboratuvar ortamında üretimini önemli hale getirmektedir. Bu şekilde elde edilen malzemenin bağlayıcı katkı olarak kullanılabilmesi, çevresel sürdürülebilirlik açısından olumlu bir alternatif sunmaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %12

Kaynaklar

[1] K. Terzaghi, R. B. Peck and G. Mesri, Soil mechanics in engineering practice. John Wiley & Sons, 1996.

[2] U. Zada, A. Jamal, M. Iqbal, S. M. Eldin, M. Almoshaogeh, S. R. Bekkouche and S. Almuaythir, Recent advances in expansive soil stabilization using admixtures: current challenges and opportunities. Case Studies in Construction Materials, vol. 18, e01985, 2023. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01985.

[3] A. Kumar and S. Sinha, Machine learning-based hybrid regularization techniques for predicting unconfined compressive strength of soil reinforced with multiple additives. Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design, 8, 228, 2025. https://doi.org/10.1007/s41939-025-00831-1.

[4] G. A. Archibong, E. U. Sunday, J. C. Akudike, O. C. Okeke and C. Amadi, A review of the principles and methods of soil stabilization. International Journal of Advanced Academic Research | Sciences, Technology and Engineering, 6(3), 89-115, 2020.

[5] A. M. S. N. Abeysinghe, L. C. Kurukulasuriya and M. C. M. Nasvi, A comparative assessment of geotechnical performance, cost and carbon footprint of expansive soil treated with cement, lime and fly ash. Geomechanics and Geoengineering, 1-19, 2025. https://doi.org/10.1080/17486025.2025.2477487.

[6] J. A. Shagiwal, Çimento ile stabilize edilmiş yumuşak killi zeminlerde zeolit ve polipropilen elyaf ilavesinin etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bartın, 72, 2023.

[7] D. Barman and S. K. Dash, Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 14(4), 1319-1342, 2022. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.02.011.

[8] L. C. Dang, H. Khabbaz and B. J. Ni, Improving engineering characteristics of expansive soils using industry waste as a sustainable application for reuse of bagasse ash. Transportation Geotechnics, 31, 100637, 2021. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100637.

[9] A. A. M. S. Mohamed, J. Yuan, M. Al-Ajamee, Y. Dong, Y. Ren and T. Hakuzweyezu, Improvement of expansive soil characteristics stabilized with sawdust ash, high calcium fly ash and cement. Case Studies in Construction Materials, 18, e01894, 2023. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01894.

[10] J. L. Díaz-López, J. Rosales, F. Agrela, M. Cabrera and G. M. Cuenca-Moyano, Evaluation of geotechnical, mineralogical and environmental properties of clayey soil stabilized with different industrial by-products: A

comparative study. Construction and Building Materials, 449, 138497, 2024. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138497.

[11] M. Hanafi, S. Bordoloi, V. Rinta-Hiiro, T. Oey and L. Korkiala-Tanttu, Feasibility of biochar for low-emission soft clay stabilization using CO_2 curing. Transportation Geotechnics, vol. 49, 101370, 2024. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101370.

[12] Y. Bai, A. Arulrajah, S. Horpibulsuk and A. Zhou, Geopolymer stabilization of carbon-negative gasified olive stone biochar as a subgrade construction material. Construction and Building Materials, 442, 137617, 2024.https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137617.

[13] V. Mohanalakshmi, V. M. Adhithiyan, R. J. Kumar and L. A. Preethi, Geotechnical properties of soil stabilized with wollastonite. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 5(3), 703-706, 2016.

[14] A. Maindkar, A. Dhatrak, S. Thakare and P. Kolhe, Effect of powder of wollastonite on soil stabilization: A review. Journal of Ceramics and Concrete Technology, 8, 1-11, 2023.

[15] L. D. Maxim and E. E. McConnell, A review of the toxicology and epidemiology of wollastonite. Inhalation Toxicology, 17(9), 451-466, 2005. https://doi.org/10.1080/08958370591002030.

[16] L. D. Maxim, R. Niebo, M. J. Utell, E. E. McConnell, S. LaRosa and A. M. Segrave, Wollastonite toxicity: an update. Inhalation Toxicology, 26(2), 95-112, 2014. https://doi.org/10.3109/08958378.2013.857372.

[17] M. M. Obeid, Crystallization of synthetic wollastonite prepared from local raw materials. International Journal of Materials Chemistry, 4(4), 79-87, 2014.

[18] H. E. Yücel and S. Özcan, Strength characteristics and microstructural properties of cement mortars incorporating synthetic wollastonite produced with a new technique. Construction and Building Materials, 223,165-176, 2019. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.195.

[19] H. H. Abo-Almaged, R. E. Ngida, N. A. Ajiba, H. E. H. Sadek and R. M. Khattab, Utilization of industrial waste materials for the preparation of wollastonite by temperature-induced forming technique. Scientific Reports, 14(1), 21752, 2024.

[20] P. S. Nikhil, P. T. Ravichandran and K. D. Krishnan, Stabilisation and characterisation of soil using wollastonite powder. Materials Today: Proceedings, 40 S161-S166, 2021.

[21] M. S. K. Kumar, A. Amati, A. C. Bhavana, K. M. K. Naik and A. Sushma, Assessment of BC soil performance using wollastonite & plastic shredded as a supplement. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 11(5),303-307, 2023.

[22] H. Pouraziz, R. V. Poursorkhabi, M. Y. Fard and R. Dabiri, Effects of wollastonite powder on the geotechnical properties of a dispersive clayey soil. Discover Applied Sciences, 6(8), 433, 2024. https://doi.org/10.1007/s42452-024-06133-4.

[23] BS 1377-2, Methods of test for soils for civil engineering purposes. Part 2: Classification tests. British Standards Institution (BSI), 1990.

[24] ASTM D4318, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2018.

[25] ASTM Committee D-18 on Soil and Rock, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft3 (600 kN-m/m3)). ASTM International, 2007.

[26] ASTM D2166, Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. ASTM International, West Conshohocken, 2016.

[27] H. E. Yücel, M. Güneş, H. Ö. Öz, Y. Kaya and A. B. Yılmaz, Comprehensive study of the properties of engineered cementitious composites incorporating synthetic wollastonite microfibers. Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 37(6), 0899-1561, 2025. https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-19058.

[28] H. E. Yücel, H. Ö. Öz, M. Güneş and Y. Kaya, Rheological properties, strength characteristics and flexural performances of engineered cementitious composites incorporating synthetic wollastonite microfibers with two different high aspect ratios. Construction and Building Materials, 306, 0950-0618, 2021.https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124921.

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 1143-1154

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Geoteknik mühendisliği problemlerinin çözümünde iki boyutlu sonlu elemanlar çözümlemesi yazılımının kullanımı: ADONIS

Using of a two dimensional finite element analysis software for solving geotechnical engineering problems: ADONIS

Betül Keseroğlu[1,*], Muhammet Dingil[2], Murat Örnek[3]

[1,2,3] *İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 31200, Hatay, Türkiye*

Öz

Geoteknik mühendisliğinde şev duraylılığı, iksa uygulaması, derin kazılar, zemin dayanma yapısı, tünel tasarımı gibi çeşitli araştırma alanları; iki boyutlu şekilde modellenerek, sayısal çözümleme teknikleri yoluyla değerlendirilebilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi ise geoteknik mühendisliğinde en yaygın kullanılan sayısal çözümleme tekniklerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntemi esas alan, herhangi bir arayüzü olmayan serbest kod blokları ile konsol uygulamaları ve bir kullanıcı arayüzüne sahip ticari, akademik, açık kaynak türü bilgisayar yazılımları yer almaktadır. Bu çalışmada, sonlu elemanlar çözümlemesini esas alan ve iki boyutlu sayısal modelleme yapılabilen ADONIS geoteknik yazılımı ele alınmıştır. Bu yazılım, içerisinde doğrusal ve doğrusal olmayan zemin bünye modelleri ve yapısal elemanlar barındıran, serbest kullanım lisansına sahip bir sonlu elemanlar analiz programıdır. ADONIS geoteknik yazılımında, program doğrulama başarımını ölçmek için, seçilen çeşitli şev duraylılığı problemleri; mukavemet azaltma yöntemiyle çözümlenmiştir. Farklı geometrik ve geoteknik tasarıma sahip şev yapılarının, gömülü kodlama diliyle bu program içerisinde duraylılık güvenlik sayıları hesaplanarak farklı geoteknik yazılımlarla kıyaslanmıştır. Sonuç olarak, ADONIS yazılımının geoteknik mühendisliğindeki iki boyutlu problemlerin çözümünde önemli bir seçenek olabileceği öngörülmektedir.

Anahtar kelimeler: ADONIS, Geoteknik yazılım, Sonlu elemanlar yöntemi, Şev duraylılığı, Mukavemet azaltma yöntemi, Düzlem gerinimi

Abstract

Various research areas in geotechnical engineering such as slope stability, shoring application, deep excavations, ground support structure, tunnel design; It can be modeled in two dimensions and evaluated through numerical analysis techniques. Finite element method stands out as one of the most widely used numerical analysis techniques in geotechnical engineering. Based on this method, there are free code blocks without any interface, console applications and commercial, academic, and open source computer software with a user interface. In this study, ADONIS geotechnical software, which is based on finite element analysis and allows two-dimensional numerical modeling, is discussed. This software is a finite element analysis program with a free use license that includes linear and non-linear soil structure models and structural elements. In ADONIS geotechnical software, various slope stability problems selected to measure program verification performance were solved by the strength reduction method. The safety factors of slope stability with different geometric and geotechnical designs were calculated with the scripting language in this program and compared with different geotechnical software. As a result, it is predicted that ADONIS software may be an important option in solving two-dimensional problems in geotechnical engineering.

Keywords: ADONIS, Geotechnical software, Finite element method, Slope stability, Strength reduction method, Plain strain

1 Giriş

Geoteknik mühendisliğinde yer alan derin kazılar, iksa yapıları, şevler, yüzeysel ve derin temeller, dayanma yapıları, dolgular, gömülü yapılar, tüneller gibi uygulamalarda gerilme-şekil değiştirme, duraylılık, güvenlik sayısı, sızma ve su akışı, taşıma gücü gibi konular geoteknik problemler olarak tanımlanmaktadır. Bu tip karmaşık ve özgül geoteknik problemlerinin çözümü için, sonlu elemanlar yöntemi (FEM), sonlu farklar yöntemi (FDM), sonlu hacim yöntemi (FVM), sınır elemanlar yöntemi (BEM), ayrık elemanlar yöntemi (DEM), malzeme nokta yöntemi (MPM), düzgünleştirilmiş parçacık hidrodinamiği (SPH) ve süreksiz biçimsizleşme çözümlemesi (DDA) gibi birçok sayısal yöntem kullanılmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi; eliptik kısmi diferansiyel denklem içeren problemler için, söz konusu alanı belirli bir sayıda daha küçük parçalara bölerek ve bu bölünmüş parçalara sınır koşullarını uygulayarak yaklaşık bir çözüm elde etmenin amaçlandığı sayısal bir tekniktir [1]. Bu yöntemin esası, fiziksel sürekli bir sistemin matematiksel olarak temsil edilmesine dayanmaktadır ve karmaşık geometriye sahip sistemler, çok sayıda basit geometrili

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: keseroglubetul98@gmail.com (B. Keseroğlu)
Geliş / Received: 14.03.2025 Kabul / Accepted: 04.07.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1658166

parçacığa bölünerek, ayrık parçacıkların çözümlenmesi biçiminde gerçekleştirilmesidir [2]. Yüksek miktarda sonlu ve birbirine bağlı elemanlardan oluşan çözüm bölgesindeki elemanların tamamında birtakım varsayımlar kullanılarak, sınır koşul ve denge denklemlerinin tanımlanması sonucu sonlu elemanlar yönteminde, yaklaşık sonuçlar hesap edilmektedir [3].

Bir sayısal modelleme paradigması olarak, sonlu elemanlar yönteminin kökeni, 1940'ların başlarına kadar uzanmaktadır ve bu yöntem, ilk olarak katı mekaniği ve yapı mühendisliğindeki sorunları çözümleyebilmek için öne çıkmıştır [4-6]. Günümüzde ise matematik-fizik alanında, havacılık ve astronomide, temel bilimlerde, tıp ve diş hekimliğinde, yer bilimlerinde, mühendisliğin birçok dalında yaygın bir çözüm olmuştur. Sonlu elemanlar çözümleme yazılımlarının geliştirilmesi ve ileri eleman tiplerinin modellenebilmesi sayesinde sonlu elemanlar yöntemi, mühendisliğin çok geniş özel alanlarına ulaşmış durumdadır [1]. İnşaat mühendisliği uygulamalarının modellenmesinde, bu yöntem, zaman geçtikçe daha da popüler olarak güçlü bir analitik araç haline gelmiştir [7]. Geoteknik mühendisliğine özgü çeşitli karmaşık sorunların mevcudiyeti, sonlu elemanlar yöntemini, geoteknik problemlerin çözümlenmesinde, sayısal değerlendirme seçeneği olarak yaygınlaştırmıştır [8]. Zeminlerin farklı özellikteki katmanlardan oluşması ve elastik yöntemlerin çözümlerde yetersiz kalması, bu yaygınlaşmadaki en temel gerekçedir [9].

Sonlu elemanlar yöntemini esas alan; herhangi bir arayüzü olmayan serbest kod blokları ile konsol uygulamaları ve kullanıcı arayüzüne sahip ticari, akademik, serbest, açık kaynak türü çeşitli verimlilikte birçok bilgisayar yazılımı seçeneği yer almaktadır. Yazılım verimliliği; geoteknik mühendisliğinde bilgisayar kullanımının öne çıkan bir tercih olmasındaki önemli etkenlerden biridir ve kullanışlılık, esneklik, erişilebilirlik gibi ölçülerle ifade edilebilmektedir [10]. Yazılım verimliliğindeki bu göreli ve değişken durum nedeniyle geoteknik mühendisliğinde yeni yazılımlar; sürekli olarak üretilmeye ve geliştirilmeye devam etmektedir. Yazılım geliştirme teknolojilerinin ilerleme kaydetmesi sayesinde, geoteknik mühendisliğindeki günümüz yazılımları; kolay kullanılabilir gelişmiş ara yüzlerde, karışık ve birbirini tamamlayan hesaplamalar gerçekleştirebilmekte ve çözüm verilerinden elde edilen çıktılar görselleştirilebilmektedir [11].

Mikola [12] tarafından geliştirilen ADONIS yazılımı, sonlu elemanlar yöntemine dayanarak iki boyutlu modelleme üzerinden geoteknik çözümlemeler yapabilen bir bilgisayar programıdır. Bu yazılım, farklı zemin bünye modelleri ile yapısal eleman türlerini destekleyen, şev duraylılığı, oturma, kazı, tünel gibi geoteknik problemleri çözümleyebilen ve halen uygulama geliştirilmesi devam eden bir geoteknik yazılımdır [13]. Serbest kullanım lisansına sahip olma, hızlı sonlu eleman ağ yapısı kurabilme ve sade bir kullanıcı arayüzüne sahip olma, bu geoteknik yazılımın öne çıkan özellikleridir ve bu sayede kullanımı her geçen gün yaygınlaşarak çoğalmaktadır. Geoteknik mühendisliği çözümlemelerine yönelik geliştirilen uygulamalar için açık kaynak yazılım geliştirme bileşenleri; tasarımlarda kullanılabilir seçeneklerden biridir [14]. Açık kaynak yazılım geliştirme araçlarından Triangle [15], QCustomPlot [16] ve Gmsh [17] bileşenleri de bu program içerisinde yer almaktadır. Literatürde, ADONIS geoteknik yazılımı kullanılarak farklı araştırmacılar tarafından yapılan, geoteknik problemlerin çözümlenmesine yönelik çeşitli bilimsel yazınlar yer almaktadır [18-27].

Bu çalışmada, serbest kullanım lisanslı ve iki boyutlu bir sonlu elemanlar çözümleme programı olan ADONIS yazılımındaki gömülü kodlama dili kullanılarak, farklı geometrik ve geoteknik tasarım esaslarına sahip şev duraylılığı problemleri, mukavemet azaltma yöntemine göre çözümlenerek elde edilen güvenlik sayıları, farklı geoteknik programlardan alınan sonuçlarla mukayese edilmiştir.

2 Yazılım

Bu bölümde, serbest kullanım izinli ve iki boyutlu tasarımcı bir sonlu elemanlar çözümleme yazılımı olan ADONIS [28] hesaplamalı benzetim uygulamasının temel özellikleri ele alınmıştır. Bu programda kullanıcı arayüzü; kapsamlı çizim olanakları, yerleşik malzeme kütüphanesi, sınır koşullarının ve yapısal elemanların kolaylıkla tanımlanması, etkileşimli modelleme ortamı, projelerin erişilebilir yönetimi ve çözümleme sonuçlarının çalışma zamanında izlenmesi gibi öne çıkan özellikleri sunabilmektedir [29]. Bu geoteknik yazılım; model geometrisi, eleman ve ağ oluşumu, malzeme ataması, sınır şartları, başlangıç koşulları, ayarlar, çözüm ve çıktı biçiminde sıralı ve yalın bir iş akışına sahiptir (bkz. Ek 1-3).

ADONIS programında, iki boyutlu modelleme için gerekli geometrik şekilleri içeren bir çizim araç kutusu yer almaktadır ve iki boyutlu model çözümlemeleri ‘düzlem gerinimi’ biçiminde yürütülmektedir. Sonlu elemanlar çözümlemesi esaslı geoteknik yazılımlarda, modelleme ortamı içerisinde, eksenel simetrik ve düzlem gerinimi şeklinde iki farklı geometrik idealizasyon yaklaşımı yer alabilmektedir [30-32].

Mühendisliğin birçok alanında ve geoteknik mühendisliğinde, zemin birimlerinin ve yapısal elemanların gerçek geometrisi ve davranışı üç boyutlu olmasına karşın bu elemanların yer aldığı bazı problemlerin çözümlenmesi; belirli kabullere dayanarak yapılan geometrik idealizasyon sonucu iki boyutlu modelleme yoluyla gerçekleştirilebilmektedir. Düzlem gerinimi, bilinmeyenleri olan gerilme-şekil değiştirme bileşenlerinin, model sisteme ait eksen takımındaki bir eksene bağlı olmadığı (çoğunlukla kalınlık doğrultusunda alınan z ekseni) bir düzlem elastisite problemleri yaklaşımıdır [33]. Düzlem gerinimi; söz konusu geoteknik modellemede bir boyutunun diğer boyutuna göre görece büyük olduğu durumlarda; eksenel simetri ise rotasyonel simetriye sahip geoteknik problemlerde uygulanabilen birtakım kabullere dayalı geometrik idealizasyonlardır [34].

Bu programda sonlu eleman ağlarının kurulması için ‘üçgen’ ve ‘dörtgen’ sonlu eleman oluşturma yöntemleri kullanılmaktadır. Yazılımda bir proje için çizilen geometride, sonlu elemanların oluşturulması; sırasıyla ‘ayrıklaştırma’ ve ‘ağ oluşturma’ adımlarıyla gerçekleştirilir. İki boyutlu modelleme ortamında yer alan geometrik sınırlar

'ayrıklaştırma' yoluyla bölümlenmesinin ardından, kullanıcı tercihine bağlı olarak 3 düğüm noktalı üçgen T3 eleman ya da 4 düğüm noktalı Q4 dörtgen eleman biçiminde sonlu eleman ağ yapısı oluşturulabilmektedir. Ayrıca üç düğüm noktalı üçgen T3 elemanlarda uygulanabilecek, Detournay ve Dzik [35] tarafından önerilen 'Düğüm Karışık Ayrıklaştırma' (NDM) metodolojisi de bu yazılım içerisinde tercihen kullanılmak üzere sunulmuştur.

ADONIS içerisinde ağ tipi, kenar boyutları ve eleman boyutları da özel olarak belirlenebilmektedir. Seçilen model ayarlarına uygun olarak hızlı biçimde otomatik sonlu eleman ağları oluşturulur. Sonlu elemanlar yönteminde, laboratuvar ortamındaki zemin numunelerinin kararsızlıkları ya da arazi ortamındaki zemin temaslı geoteknik yapılar; klasik süreklilik mekaniği esaslı zemin bünye modelleri kullanılarak sayısal olarak benzetilir [36]. Geoteknik mühendisliğinde yaygın kullanım hedefiyle sunulan bu yazılımda, farklı amaçlar doğrultusunda, zeminlerin modellenmesi için kullanılabilecek çeşitli zemin bünye modellerini içermektedir (Tablo 1).

Tablo 1. ADONIS'de yer alan zemin bünye modelleri

Zemin Bünye Modeli	Tasarım Özelliği
İzoelastik	Doğrusal ve sürekli elastik ve izotropik malzeme modeli
Mohr-Coulomb	Gerilme düzeyi kohezyon, içsel sürtünme açısı ve dilatasyon açısı ile sınırlanan elasto-tam plastik model
Hoek-Brown	Kaya kütleleri için en yaygın kullanılan aynı adlı yenilme kriteri esas alınarak oluşturulan doğrusal olmayan model
Gerinim Yumuşaması	Plastik kayma gerinimlerinin sürekli gelişimiyle kayma direncinin azaldığı davranış modeli
Cam Kili	Normal konsolide ve hafif aşırı konsolide zeminlere uygun klasik elastoplastik zemin modeli
Şişme	Akma ve potansiyel fonksiyonları ile gerilim düzeltmeleri Mohr-Coulomb kriterine dayanır ve şişme gerilimleri, küresel gerilme bileşenlerine, artırımlı adımlarla ilave olarak eklenen model
Plastik Pekleşen	Gerilme düzeyi kalibre edilmesi çok değişkenli olan ileri seviye karmaşık kesme ve hacimsel pekleşme modeli
Ubiquitous-Joint	Kaya kütlesindeki eklemlenmeyi de hesaba katan bünye modeli

ADONIS geoteknik yazılımının sahip olduğu en önemli özelliklerinden biri de "kazı" ve "dolgu" biçiminde hızlandırılmış malzeme etki komutlarının yer almasıdır. "kazı" ve "dolgu" malzeme etki komutlarıyla, program içerisinde tanımlanan malzeme geometrisindeki herhangi bir alan, tek bir komutla doğrudan kazı ya da dolgu bölgesi olarak atanabilmektedir. Bu programda, Tablo 1'te yer alan zemin model bünyeleri haricinde tutkal durumu ve Coulomb kayma gerilmesi olarak iki farklı etkileşim modeli yer almaktadır. Tutkal durumu etkileşimi, kayma veya açılmanın mümkün olmadığı fakat elastik yer değiştirmenin görülebildiği malzeme etkileşim modelidir. Coulomb kayma gerilmesi etkileşimi ise kesme kuvvetinin sınırlandığı malzeme etkileşim tipidir ve etkin temas uzunluğu (L) ile ara yüzey kohezyon (c) ve sürtünme açısı (φ) değişkenlerine bağlıdır (Denklem 1).

$$F_{smax} = c * L + tan\varphi * F_n \quad (1)$$

ADONIS yazılımında talep edilmesi durumunda, kullanıcılar tarafından zemin bünye modeli tanımlanarak program içerisine dinamik bağlantı kitaplığı (.dll) dosyası biçiminde entegre edilebilmektedir [29]. Bu yazılım içerisinde, çeşitli zemin bünye modelleriyle birlikte yararlanılabilecek farklı tip yapısal elemanlar da bulunmaktadır (Tablo 2).

Tablo 2. ADONIS'de yer alan yapısal elemanlar

Yapısal Eleman Türü	Öne Çıkan Özelliği
Kiriş	Uç düğüm noktalarında, üç serbestlik derecesine (x-öteleme, y-öteleme ve dönme) sahip iki boyutlu eleman
Kablo	Sonlu eleman ağı deforme oldukça, eleman uzunluğu boyunca kuvvetler geliştiren tek boyutlu eksenel eleman
Ankraj	Harçla doldurulmuş ankraj desteğinin davranışını temsil eden ankraj elemanı
Şerit	Güçlendirilmiş zemin istinat duvarlarının modellenmesinde kullanılmak üzere tasarlanan ince takviye şerit elemanı

ADONIS yazılımında; tamamı statik durum için geçerli olmak üzere limit denge, elastik, güvenlik sayısı, gevşeme şeklinde farklı çözüm seçenekleri yer almaktadır. Limit denge çözümünde denge durumuna veya sınır adım sayısına ulaşana dek hesaplamalar sürdürülür. Elastik çözüm, malzemelerin doğrusal olmayan davranışının göz ardı edildiği hızlı sonuç veren bir yöntemdir. Gevşeme çözümü, büyük bir çekme gerilimi dalgasını önlemek amacıyla bir kazının içindeki kuvvetleri yavaşça azaltmak için kullanılan bir yöntemdir. Güvenlik sayısı çözümünde ise mukavemet azaltma yöntemi temel alınmaktadır. Mukavemet azaltma yöntemi, geomekanik alanında giderek popüler hale gelen bir sayısal tekniktir ve zeminin kayma dayanımının (τ_f) kademeli olarak azaltılması ilkesine dayanmaktadır [37]. τ_f değeri, kohezyon değeri (c') ve içsel sürtünme açısı (φ'), kayma yüzeyine etki eden etkin normal gerilme (σ') ve güvenlik sayısına bağlı bir denklemle ifade edilir ve güvenlik sayısı (GS), kabul edilemeyecek kadar büyük şekil değiştirmeler veya hesaplamadaki sapmalarla tanımlanan başarısızlığa kadar artırılır (Denklem 2).

$$\frac{\tau_f}{GS} = \frac{c' + \sigma' * tan\varphi'}{GS} \quad (2)$$

ADONIS içerisinde kullanıcının yazılım yeteneklerini genişletmek veya kullanıcı tanımlı özellikler eklemek için kullanılabilir yeni değişkenler ve işlevler tanımlamasını sağlayan bir gömülü kodlama dili yer almaktadır. ADONIS geomekanik yazılım paketi içerisinde yer alan bu gömülü kodlama dili, programın komut ve betik yazım kurallarını ifade etmektedir [38]. Birçok geoteknik mühendisliği yazılımında kullanımı yaygınlaşan gömülü kodlama dilleri; kullanıcı arayüzünden bağımsızlık, hızlı modelleme ve

parametrik çalışma kolaylıklarını sağlayabilen programlara özel sözdizimleridir.

3 Modelleme

Bu bölümde, ADONIS geoteknik yazılımının doğrulama başarımını ortaya koymak için, birtakım bilimsel yayınlardan derlenen şev duraylılığı problemleri, iki boyutlu düzlem gerinim yaklaşımıyla modellenmiştir. Tablo 3'te ayrıntıları paylaşılan, bazı bilimsel yayınlardan derlenen farklı geometrik ve geoteknik tasarıma sahip şev yapıları, ADONIS programındaki gömülü kodlama dili kullanılarak sırasıyla iki boyutlu modellenmiştir.

Tablo 3. Doğrulama için seçilen şev duraylılığı problemleri

Analiz No	Şev Duraylılığı Problemi	Kaynak
1	Homojen zemin	Giam ve Donald [39]
2	Heterojen zemin	Giam ve Donald [39]
3	Çok katmanlı zemin	Christian vd. [40]
4	Zayıf tabakalı zemin	Arai ve Tagyo [41]
5	Düşey yüklemeye maruz kohezyonlu zemin	Prandtl [42]
6	Doygun kil zemine oturan dolgu	Duncan vd. [43]
7	Yer altı suyu bulunan zayıf katmanlı zemin	Giam ve Donald [39]
8	Zemin çivisiyle desteklenmiş kazı	Sheahan [44]

Tablo 3'te ayrıntıları açıklanan ve kaynakları paylaşılan şev duraylılığı problemlerine ait hem kıyaslama yapılan ilgili referans kaynaklarda hem de bu çalışmada gerçekleştirilen çözümlemelerde kullanılan problem esaslı model parametreleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Analizlerde kullanılan model parametreleri

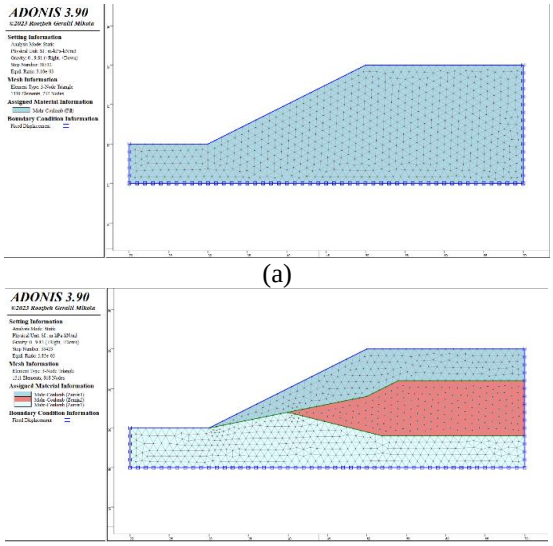
Analiz No	Zemin Modeli	γ (kN/m^3)	c (kN/m^2)	ϕ (°)
1	Mohr-Coulomb	2.04	3	19.6
2	Mohr-Coulomb	1.99, 1.99, 1.99	0, 5.3, 7.2	38, 23, 20
3	Mohr-Coulomb	2.04, 2.04, 1.92, 2.07	0, 41, 34.5, 31.2	30, 0, 0, 0
4	Mohr-Coulomb	1.92, 1.92, 1.92	29.4, 9.8, 294	12, 5, 40
5	Mohr-Coulomb	1.02E-7	49	0
6	Mohr-Coulomb	0.64, 2.24	0, 119.7	40, 0
7	Mohr-Coulomb	1.92, 1.92	28.5, 0	20, 10
8	Mohr-Coulomb	1.93	25	0

Tablo 4 içerisinde verilen birim hacim ağırlık (γ), içsel sürtünme açısı (ϕ) ve kohezyon katsayısı (c) değerleri; her problemde yer alan tabaka sayısı ve sırası kadar paylaşılmıştır. Tablo 3'te yer alan referans kaynaklarla kıyaslayabilmek için bu çalışma içerisinde gerçekleştirilen ADONIS programındaki çözümlemelere ait ağ oluşturma bilgileri ise Tablo 5'de sunulmuştur.

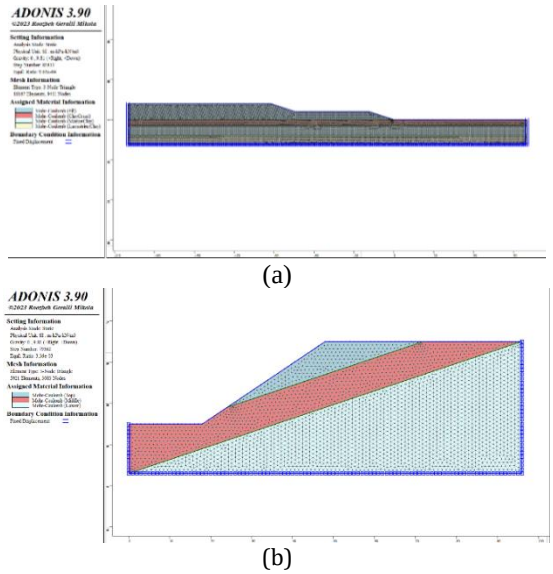
Tablo 5. Bu çalışmada kullanılan ağ oluşturma verileri

3 Düğüm Noktalı Ağ Oluşturma			
No	Güvenlik Sayısı	Eleman Sayısı	Düğüm Sayısı
1	1.002	1339	732
2	1.361	1497	811
3	1.210	18167	9411
4	0.389	5921	3083
5	1.014	1594	854
6	1.020	1638	898
7	1.240	3976	2070
8	0.833	266	160

Homojen ve heterojen zeminlerin şev duraylılığı modellemeleri Şekil 1'de, çok katmanlı ve zayıf tabakalı zeminlerin modellemeleri ise Şekil 2'de paylaşılmıştır.



Şekil 1. Şev duraylılık modelleri: a) homojen zemin; b) heterojen zemin



Şekil 2. Şev duraylılık modelleri: a) çok katmanlı zemin; b) zayıf tabakalı zemin

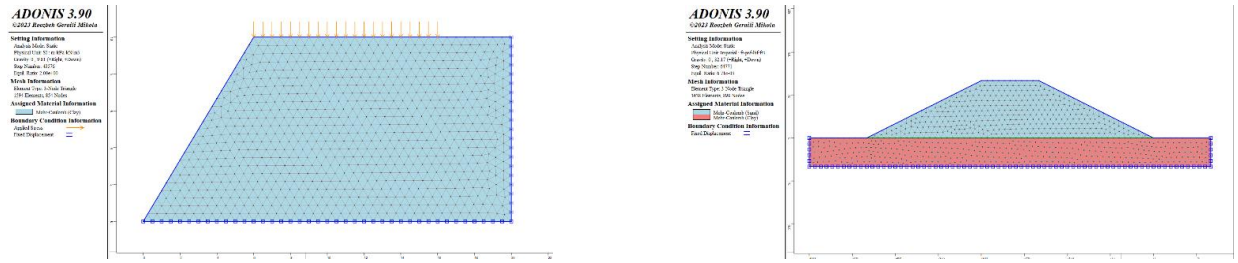
Şekil 3'te düşey yüklemeye maruz kohezyonlu zemin ile doygun kil zemine oturan bir dolgu için şev duraylılığı modellemeleri, Şekil 4'te ise yer altı suyu olan zayıf katmanlı zemin ile zemin çivisiyle desteklenmiş bir kazı için şev duraylılığı modellemeleri sunulmuştur.

4 Analiz

Bu bölümde, ADONIS geoteknik yazılımında modellenen iki boyutlu şev duraylılık problemlerinin çözümleme sonuçları ile ADONIS programından elde edilen duraylılık güvenlik sayılarının farklı ticari programlarla veya teorik çözümlerle kıyaslanması sunulmuştur.

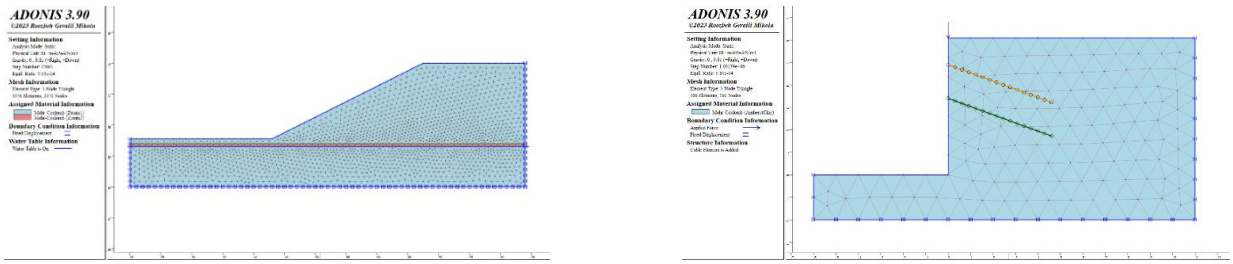
Bu çalışmada, ADONIS yazılımından elde edilen çıktılar; geoteknik mühendisliğinde kullanılan DEEPEX [45], RS2 [46], SLIDE2 [47], GEOSTUDIO [48], UTEXAS4 [49], SVSLOPE [50] gibi ticari/paket yazılımlarda hesaplanmış güvenlik sayılarıyla mukayese edilmiştir.

Homojen ve heterojen zeminlerin şev duraylılık çözümlemeleri ile güvenlik sayıları kıyaslaması Şekil 5 ve Tablo 6'da, çok katmanlı ve zayıf tabakalı zeminlerin şev duraylılık çözümlemeleri ile güvenlik sayıları karşılaştırması ise Şekil 6 ve Tablo 7'de paylaşılıştır.



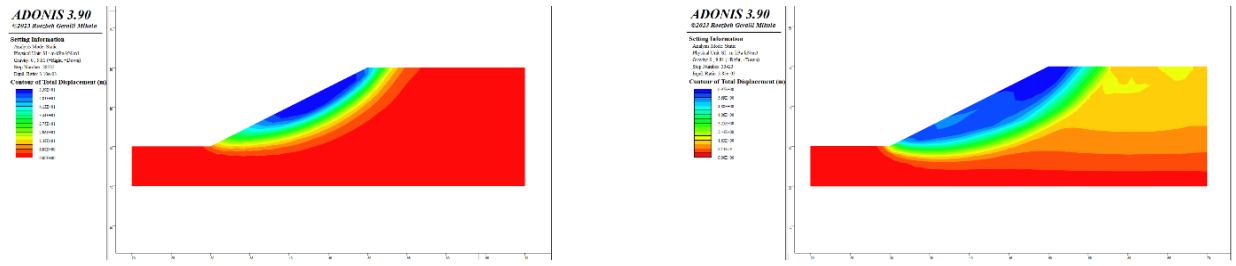
(a) (b)

Şekil 3. Şev duraylılık modelleri: a) düşey yüklemeye maruz kohezyonlu zemin; b) doygun kil zemine oturan bir dolgu



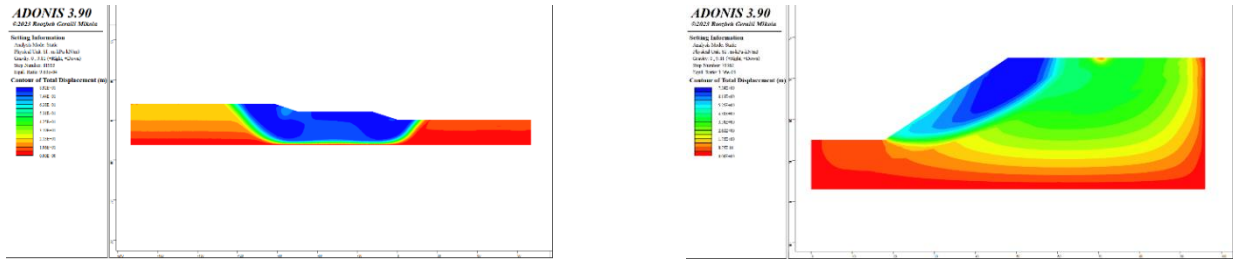
(a) (b)

Şekil 4. Şev duraylılık modelleri: a) yer altı suyu olan zayıf katmanlı zemin; b) zemin çivisiyle desteklenmiş bir kazı



(a) (b)

Şekil 5. Şev duraylılık modelleri: a) homojen zemin; b) heterojen zemin



(a) (b)

Şekil 6. Şev duraylılık çözümlemeleri: a) çok katmanlı zemin; b) zayıf tabakalı zemin

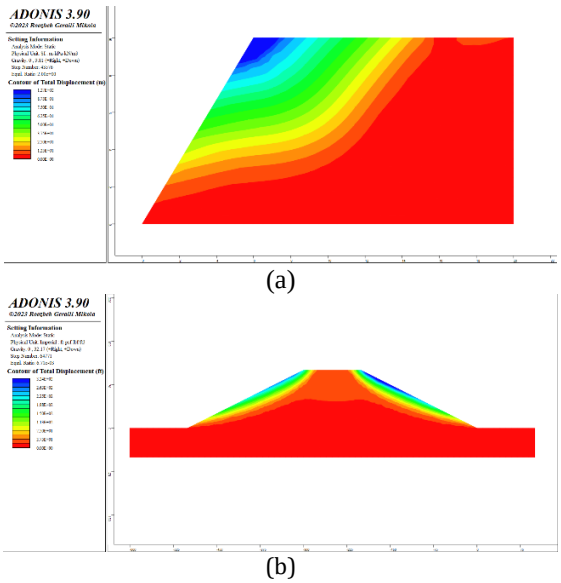
Tablo 6. Homojen ve heterojen zeminler için şev duraylılığı çözümlemesi

Kıyaslanan Değerler	Homojen Zemin Güvenlik Sayısı	Heterojen Zemin Güvenlik Sayısı
ADONIS	1.002	1.361
DEEPEX (Bishop)	0.994	1.384
RS2 (SSR)	0.980	1.340
SLIDE2 (Spencer)	0.986	1.375
GEOSTUDIO (MP)	0.993	1.382
Giam ve Donald [39]	1.000	1.390

Tablo 7. Çok katmanlı zemin ile zayıf tabakalı zemin için şev duraylılığı çözümlemesi

Çok Katmanlı Zemin		Zayıf Tabakalı Zemin	
Kıyaslanan Değer	Güvenlik Sayısı	Kıyaslanan Değer	Güvenlik Sayısı
ADONIS	1.21	ADONIS	0.389
RS2 (SSR)	1.19	RS2 (SSR)	0.410
SLIDE2 (Spencer)	1.16	SLIDE2 (Spencer)	0.413
UTEXAS4 (NSR)	1.16	Kim vd. [52]	0.390
Duncan ve Wright [51]	1.17	Greco [53]	0.388
Duncan vd. [43]	1.17	Malkawai vd. [54]	0.401

Düşey yüklemeye maruz kohezyonlu zemin ile doygun kil zemine oturan dolgu için şev duraylılık çözümlemeleri ile güvenlik sayıları kıyaslaması Şekil 7 ve Tablo 8'de; yer altı suyu olan zayıf katmanlı zemin ile zemin çivisiyle desteklenmiş kazı için şev duraylılık çözümlemeleri ile güvenlik sayıları karşılaştırması ise Şekil 8 ve Tablo 9'da verilmiştir.



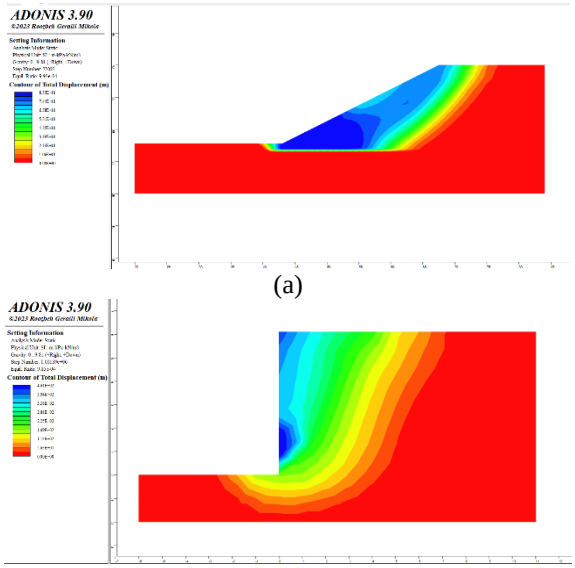
(a)

(b)

Şekil 7. Şev duraylılık çözümlemeleri: a) düşey yüklemeye maruz kohezyonlu zemin; b) doygun kil zemine oturan dolgu

Tablo 8. Düşey yüklemeye maruz kohezyonlu zemin ile doygun kil zemine oturan dolgu için şev duraylılığı çözümlemesi

Düşey Yüklemeye Maruz Kohezyonlu Zemin		Doygun Kohezyonlu Zemine Oturan Dolgu	
Kıyaslanan Değer	Güvenlik Sayısı	Kıyaslanan Değer	Güvenlik Sayısı
ADONIS	1.014	ADONIS	1.02
RS2 (SSR)	1.010	RS2 (SSR)	1.19
SLIDE2 (Spencer)	1.051	SLIDE2 (Spencer)	1.20
GEOSTUDIO (MP)	1.017	GEOSTUDIO (Janbu)	1.07
Chen ve Shao [55]	1.050	UTEXAS4 (Bishop)	1.22
Prandtl [42]	1.000	Duncan vd. [43]	1.08



(a)

(b)

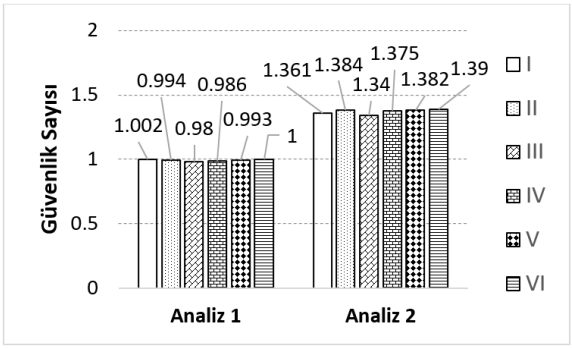
Şekil 8. Şev duraylılık çözümlemeleri: a) yer altı suyu olan zayıf katmanlı zemin; b) zemin çivisiyle desteklenmiş bir kazı

Tablo 9. Yer altı suyu olan zayıf katmanlı zemin ile zemin çivisiyle desteklenmiş kazı için şev duraylılığı çözümlemesi

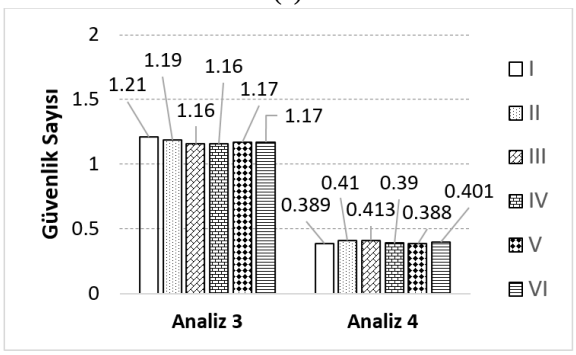
Yer altı suyu olan zayıf katmanlı zemin		Zemin çivisiyle desteklenmiş bir kazı	
Kıyaslanan Değer	Güvenlik Sayısı	Kıyaslanan Değer	Güvenlik Sayısı
ADONIS	1.240	ADONIS	0.833
RS2 (SSR)	1.240	SVSLOPE (LE)	0.890
SLIDE2 (Spencer)	1.257	SLIDE2 (Janbu)	0.890
GEOSTUDIO (Janbu)	1.229	GEOSTUDIO (MP)	0.869
Giam ve Donald [39]	1.24-1.27	Sheahan ve Ho [56]	0.887

5 Bulgular

Bu bölümde, öncelikle Tablo 6-9 arasında paylaşılan her bir analiz türü için elde edilen sonuçlar, bu tablolarda belirtilen program numaraları esas alınarak Şekil 9 ve Şekil 10 içerisinde sunulmuştur.

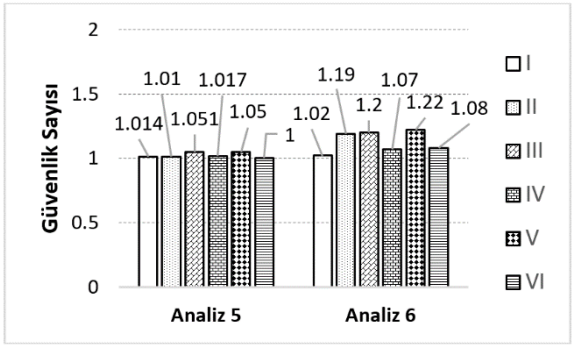


(a)

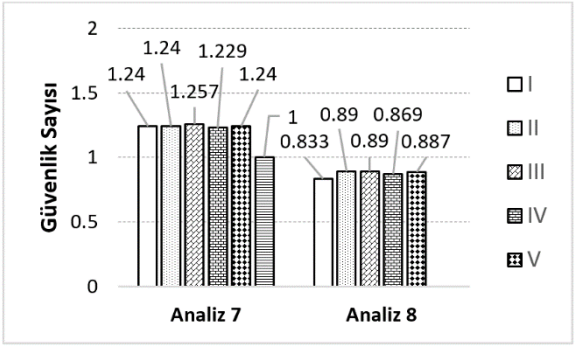


(b)

Şekil 9. Güvenlik sayıları sonuçları: a) homojen zemin ve heterojen zemin; b) çok katmanlı zemin ve zayıf tabakalı zemin



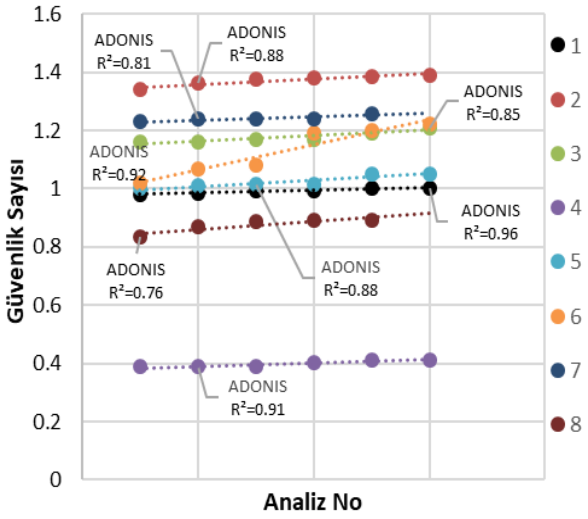
(a)



(b)

Şekil 10. Güvenlik sayıları sonuçları: a) düşey yüklemeye maruz kohezyonlu zemin ve doygun kil zemine oturan dolgu; b) yer altı suyu olan zayıf katmanlı zemin ve zemin çivisiyle desteklenmiş bir kazı

ADONIS programından elde edilen çözümleme sonuçları ile Tablo 6-9 içerisindeki diğer geoteknik yazılımlardan ve Tablo 3'te verilen referans kaynaklardan alınan güvenlik sayıları; istatistiksel olarak Şekil 11'de mukayese edilmiştir.



Şekil 11. ADONIS yazılımındaki çözümlemeler ile diğer kaynaklardan alınan sonuçların kıyaslanması

Şekil 11 incelendiğinde, yapılan basit doğrusal bağlanım analizlerine göre ADONIS yazılımının başarımı, literatürde kullanılan diğer geoteknik programlara ve problemlerin alındığı referans kaynaklara kıyasla oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu programda çözümlenen güvenlik sayılarının, sekiz farklı geoteknik mühendisliği problemi için literatürdeki diğer çözümleme sonuçlarıyla kıyaslandığında, ADONIS yazılımının diğer referanslarla olan nicel uyumunu ifade eden doğrusal esaslı belirleme katsayılarının (R^2) tüm analizler 0.76-0.96 aralığında kaldığı tespit edilmiştir.

6 Sonuçlar

Bu çalışmada, geoteknik mühendisliği problemleri için kullanılan iki boyutlu sonlu elemanlar çözümleme yazılımı ADONIS incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar ve görüşler, aşağıda ifade edilmiştir:

- ADONIS, geoteknik mühendisliği problemleri için düzlem gerinimi geometrik idealizasyonuna göre iki boyutlu modelleme ortamı sağlayan bir sonlu elemanlar çözümleme programıdır. ADONIS geoteknik yazılımı kapsamında, izoelastik ve doğrusal olmayan zemin bünye modelleri ile kiriş, kablo, ankraj ve şerit türü yapısal elemanlar yer almaktadır. ADONIS içerisinde statik koşullar altında gerçekleştirilebilen limit denge, elastik, güvenlik sayısı, gevşeme gibi çözüm seçenekleri bulunmaktadır. Kolay değiştirilebilir bir tasarım sunmak ve modellerde parametrik analizleri yürütebilmek için kendisine ait bir gömülü kodlama dili bulunan ADONIS yazılımı, geoteknik mühendislerine yönelik yaygın kullanım amacıyla serbest kullanım lisansıyla paylaşılmıştır.

- ADONIS programının bu makale bölümleri içerisinde model çözümleme seçenekleri, grafiksel kullanıcı arayüzü ve gömülü programlama dili gibi sunulan ve tartışılan özellikleriyle serbest kullanım lisansına sahip olması ve herhangi bir kısıtlama olmadan mühendisler ve araştırmacılar tarafından kullanılabilir olması önemli farklılıklarından biridir. Buna ek olarak, özellikle gömülü programlama diliyle entegre bir yapıya sahip olan ADONIS yazılımına ait sözdizimi kullanılarak belirli değişkene bağlı döngüsel çözümlemelerin ve problemlerde parametrik çalışmaların yapılması, programdaki öne çıkan özgün katkılardan biri olarak görülmektedir.
- ADONIS geoteknik programının kullanılabilirliğini örnek olarak ortaya koymak adına yazılımdaki gömülü kodlama dili kullanılarak, farklı geometrik ve geoteknik tasarım şartlarındaki şev duraylılığı problemleri, mukavemet azaltma yöntemine göre çözümlenmiştir. ADONIS içerisinde modellenen her bir şev duraylılığı problemi için hesap edilen güvenlik sayıları; geoteknik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan diğer ticari programlardan alınan sonuçlarla ve teorik yaklaşımlara göre yapılan sayısal çözümlerle kıyaslanmıştır. Bu çalışmada, basitten karmaşığa doğru ele alınan şev duraylılığı problemlerinin ADONIS çözümleme sonuçlarının, diğer paket programların ve teorik çözümlerin sonuçlarıyla son derece yakın sonuçlar verdiği ortaya koyulmuştur. Sonuç olarak, ADONIS geoteknik yazılımının şev duraylılığı, iksa uygulaması, derin kazılar, zemin dayanma yapısı, tünel yapılar gibi çeşitli geoteknik mühendisliği tasarım amaçları için kullanılabilir olduğu düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmada yer alan ikinci yazar, TÜBİTAK 2211-A Genel Yurt İçi Doktora Programı ve YÖK 100/2000 Doktora Projesi kapsamında desteklenmektedir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik Oranı (iThenticate): %5

Kaynaklar

[1] L. Sabat and C. K. Kundu, History of finite element method: A review, in Recent Dev. Sustain. Infrastruct. Sel. Proc. ICRDSI, 75, 395-404, 2021. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4577-1_32.

[2] M. Kaçmaz, Geoteknik problemlerin farklı sonlu elemanlar programları ile çözümlenmesi: örnek bir uygulama. Yüksek Lisans Tezi Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Türkiye, 2022.

[3] M. Güler and S. Şen, Sonlu Elemanlar Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler, Ordu Üni. Bilim ve Teknol. Derg., 5(1), 56-66, 2015.

[4] A. Hrennikoff, Solution of problems of elasticity by the framework method, J. Appl. Mech., 8(4), 169-175, 1941. https://doi.org/10.1115/1.4009129.

[5] G. R. Liu and S. S. Quek, The Finite Element Method: A Practical Course: Second Edition, Butterworth-Heinemann, 2014. https://doi.org/10.1016/C2012-0-00779-X.

[6] W. K. Liu, S. Li, and H. S. Park, Eighty years of the finite element method: Birth, evolution, and future, Arch. Comput. Methods Eng., 29(6), 4431-4453, 2022. https://doi.org/10.1007/s11831-022-09740-9.

[7] R. G. Mikola, Analysis of SEM Tunnel with Quasi-Static Explicit Finite Element, in ARMA US Rock Mech. Symp., 1367, 2020.

[8] D. M. Potts, L. Zdravković, T. I. Addenbrooke, K. G. Higgins, and N. Kovačević, Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Volume Two - Application, Thomas Telford London, 2001. https://doi.org/10.1680/feaigea.27831.fm.

[9] N. Ural and A. Gergin, Foundation design on problematic soils with high underground water level, Rev. la Construcción, 19(3), 233-245, 2020.

[10] M. Dingil, Zemin mekaniğinde endeks deneyleri için internet tabanlı bir uygulamanın geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye 2020.

[11] H. Yıldırım, Geoteknik yazılımların zamana bağlı gelişimi ve kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2021.

[12] R. G. Mikola, ADONIS: A free finite element analysis software with an interactive graphical user interface for geoengineers, in GeoOttawa2017 Conf., 2017.

[13] T. Tsvetkova and N. Kerenchev, Review of open source software for modelling and analysis of structures, in IOP Conf. Series: Mater. Sci. and Eng., 12003, 2020. https://doi.org/10.1088/1757-899X/951/1/012003.

[14] M. Dingil, Y. Türedi, and M. Örnek, Geoteknik Mühendisliğinde Açık Kaynaklı Yazılım Geliştirme Araçlarının Kullanımı: Hidrometre Deneyi Örneği, Dicle Üni. Müh. Fak. Müh. Derg., 11(3), 1431-1442, 2020. https://doi.org/10.24012/dumf.754582.

[15] J. R. Shewchuk, Triangle: Engineering a 2D quality mesh generator and Delaunay triangulator, in Workshop on Applied Computational Geometry, 203-222, 1996. https://doi.org/10.1007/BFb0014497.

[16] E. Eichhammer, QCustomPlot Qt C++: Widget for plotting and data visualization, 2020.

[17] C. Geuzaine and J.-F. Remacle, Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre-and post-processing facilities, Int. J. Numer. Methods Eng., 79(11), 1309-1331, 2009. https://doi.org/10.1002/nme.2579.

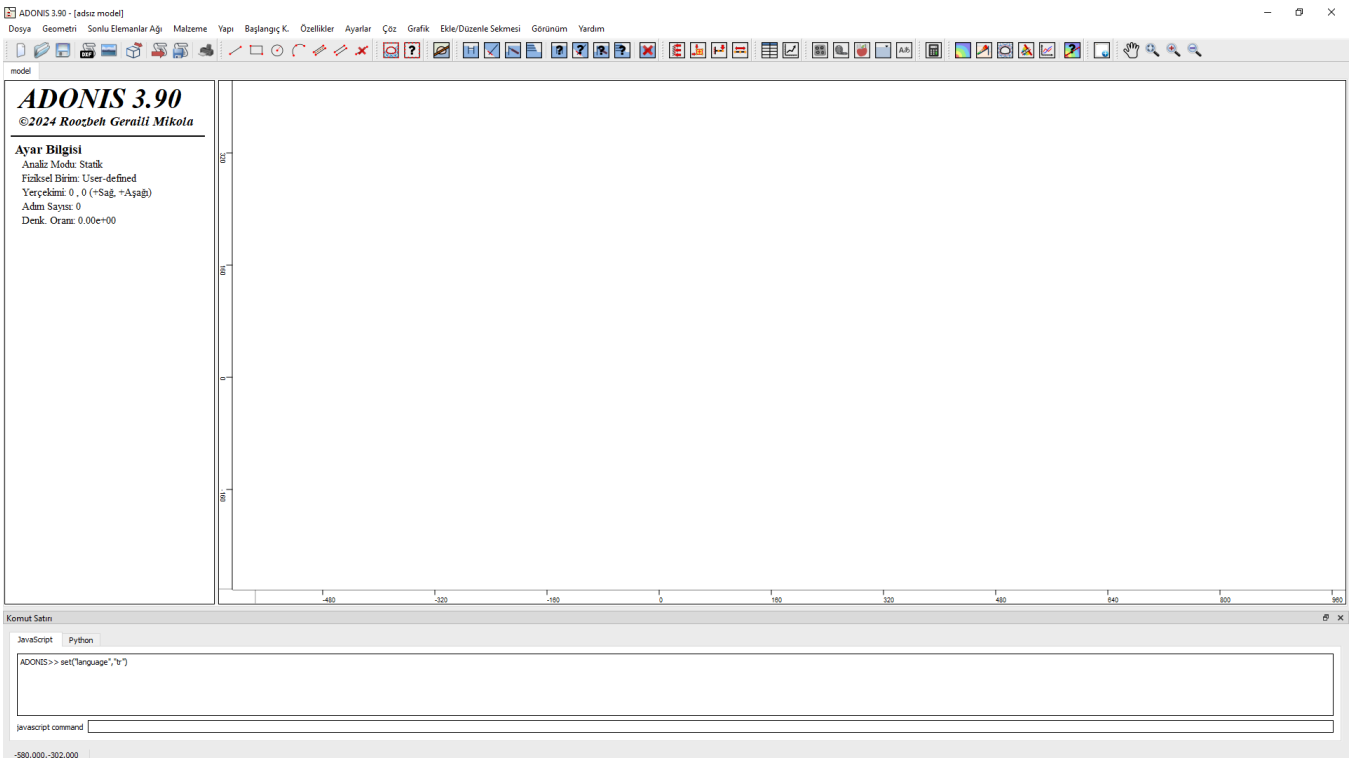
[18] K. Brzeziński, T. Rybicki, and K. Józefiak, Analysis of stability of railway embankment including horizontal forces in light of Eurocode, in MATEC Web of Conferences, 196, 03016, 2018. https://doi.org/10.1051/matecconf/201819603016.

[19] N. Cristelo, C. Félix, and J. Figueiras, Experimental behaviour of concrete box culverts—comparison with

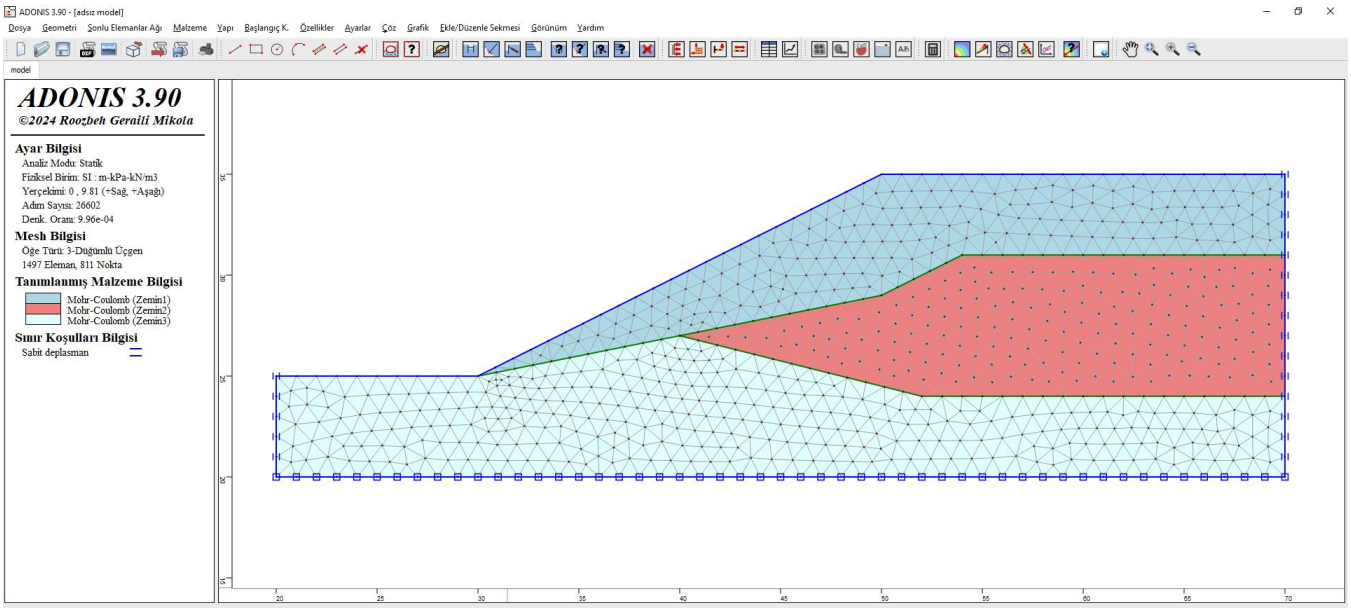
current codes of practice, Can. Geotech. J., 56(7), 970-982, 2019. https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0506.
[20] L. Guerriero et al., Kinematics and geologic control of the deep-seated landslide affecting the historic center of Buonalbergo, southern Italy, Geomorphology, 394, 107961, 2021. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107961.
[21] G. Sreelakshmi and M. N. Asha, Numerical Investigation of Soil–Structure Interaction Behaviour of Landslide Prevention Piles. In: Adhikari, Geohazard Mitigation. Lecture Notes in Civ. Eng., 192, 293-304, 2022. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6140-2_24.
[22] B. Van den Bout, L. Lombardo, M. Chiyang, C. van Westen, and V. Jetten, Physically-based catchment-scale prediction of slope failure volume and geometry, Eng. Geol., 284, 105942, 2021. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105942.
[23] H. V Gajjar, A. Srivastava, and V. D. Ujeniya, Application of multi linear regression (MLR) analysis for predicting settlement reduction ratio (S_r) of stone columns reinforced soft ground, Mater. Today Proc., 72, 459-464, 2023. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.350.
[24] S. Syaiful, F. M. L. Taqwa, and R. Muktadir, Evaluation of failure and design of structural reinforcement for gabion-type retaining walls, Ibn Khaldun Int. J. Appl. Sci. Sustain., 1(1), 69-88, 2023.
[25] B. J. Yian and Z. A. Talib, Simulation of 2D ground movement due to tunnel excavation using Finite Element Method (FEM), in IOP Conf. Series: Earth and Environ. Sci., 12067, 2023. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1205/1/012067.
[26] J. K. Y. Chiu, and Sari, M, Determining REV for jointed rock masses using finite numerical analysis, in New Challenges in Rock Mech. and Rock Eng., 244-249, CRC Press, 2024.
[27] R. Basirat, Analysis of tunnel lining internal forces under the influence of S and P-waves: An analytical solution and quasi-static numerical method, Rock Mech. Bullet., 4(1), 100168, 2025. https://doi.org/10.1016/j.rockmb.2024.100168.
[28] ADONIS, ADONIS: Free Finite Element Method Program, version 3.90.0, Main Developer: Roozbeh Geraili Mikola, PhD, P.E, 2025.
[29] GeoWizard, GeoWizard - Free Programs for Geoengineers", URL: http://www.geowizard.org, 2025.
[30] E. Turan, Statik ve dinamik düşey yükler altındaki kazıklı temellerin davranışı. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2006.
[31] M. Berilgen, Geoteknik Mühendisliğinde Sayısal Yöntemler ve Program Kullanımı, Geoteknik Meslekiçi Eğitim Kursu, İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, 2016.
[32] H. Kılıç, Geoteknik Mühendisliğinde Sayısal Analizler Notları, Geoteknik Meslekiçi Eğitim Kursu, İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, 2017.
[33] H. Gazi and N. K. Öztorun, Düzlem Elastisite Problemlerinin Analizi Kapsamında Sonlu Elemanlar Metoduyla Çalışan Bir Yazılımın Geliştirilmesi, Yapı Dünyası, 179, 11-17, 2011.
[34] E. Tekin, Köprü ve Geoteknik Mühendisliğinde Kullanılan Yeni Nesil Teknikler, Sonlu Elemanlar Yöntemi Semineri Kurs Eğitim Notları, İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi, 2017.
[35] C. Detournay and E. Dzik, Nodal mixed discretization for tetrahedral elements, in 4th International FLAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics, 2006.
[36] J. Liu, L. Wu, K. Yin, C. Song, X. Bian, and S. Li, Methods for solving finite element mesh-dependency problems in geotechnical engineering—A review, Sustainability, 14(5), 2982, 2022. https://doi.org/10.3390/su14052982.
[37] E. Soranzo, C. Guardiani, Y. Chen, Y. Wang, and W. Wu, Convolutional neural networks prediction of the factor of safety of random layered slopes by the strength reduction method, Acta Geotech., 18(6), 3391-3402, 2023. https://doi.org/10.1007/s11440-022-01783-3.
[38] Y. W. Bekele, GeoSim. AI: AI assistants for numerical simulations in geomechanics, arXiv preprint arXiv:2501.14186, 2025.
[39] P. S. K. Giam and I. B. Donald, Example Problems for Testing Soil Slope Stability Programs, Civil Engineering Research Report No. 8/1989, Monash University, Melbourne, Aust. 1989.
[40] J. T. Christian, C. C. Ladd, and G. B. Baecher, Reliability applied to slope stability analysis, J. Geotech. Eng., 120(12), 2180-2207, 1994. https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339410(1994)120:12(2180).
[41] K. Arai and K. Tagyo, Determination of noncircular slip surface giving the minimum factor of safety in slope stability analysis, Soils Found., 25(1), 43-51, 1985. https://doi.org/10.3208/sandf1972.25.43.
[42] L. Prandtl, Bemerkungen über die Entstehung der Turbulenz, ZAMM-J. App. Math. Mech., 1(6), 431-436, 1921. https://doi.org/10.1002/zamm.19210010602.
[43] J. M. Duncan, S. G. Wright, and T. L. Brandon, Soil Strength and Slope Stability: 2nd Edition, John Wiley & Sons Inc, 2014.
[44] T. C. Sheahan, A Field Study of Soil Nails in Clay at the University of Massachusetts Amherst National Geotechnical Experimentation Site, Geotechnical Special Publication, 93, 250-263, ASCE, 2000.
[45] DEEPEX, DeepEx Software Program User's Manual, Deep Excavation, 2020.
[46] RS2, 2D Finite Element Program for Slope and Excavation Stability Analyses, Slope Stability Verification Manual – Pt 4, Rocscience Inc., 2021.
[47] SLIDE2, Slope Stability Verification Manual, Rocscience Inc., 2022.
[48] GEOSTUDIO, Slope Stability Verification Manual, Seequent Limited, 2024.

[49] S. G. Wright, UTEXAS4—A Computer Program for Slope Stability Calculations, Shinoak Software, Austin, Texas, 1999.
[50] SVSLOPE, Slope Stability Analysis Software, Bentley Systems, 2019.
[51] J. M. Duncan, and S. G. Wright, Soil Strength and Slope Stability, John Wiley & Sons Inc, 2005.
[52] J. Kim, R. Salgado, J. Lee, Stability analysis of complex soil slopes using limit analysis, J. Geotech. Geoenviron. Eng., 128(7), 546-557, 2002. https://doi.org/10.1061/(ASCE)10900241(2002)128:7(546).
[53] V. R. Greco, Efficient Monte Carlo technique for locating critical slip surface, J. Geotech. Eng., 122(7), 517-525, 1996. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:7(517).
[54] A. I. H. Malkawi, W. F. Hassan, and S. K. Sarma, Global search method for locating general slip surface using Monte Carlo techniques, J. Geotech. Geoenviron. Eng., 127(8), 688-698, 2001. https://doi.org/10.1061/(ASCE)10900241(2001)127:8(688).
[55] Z. Chen, and C. Shao, Evaluation of minimum factor of safety in slope stability analysis, Canadian Geotech. J., 25, 735-748, 1988. https://doi.org/10.1139/t88-084.
[56] T. C. Sheahan and C. L. Ho, Simplified trial wedge method for soil nailed wall analysis, J. Geotech. Geoenviron. Eng., 129(2), 117-124, 2003. https://doi.org/10.1061/(ASCE)10900241(2003)129:2(117).

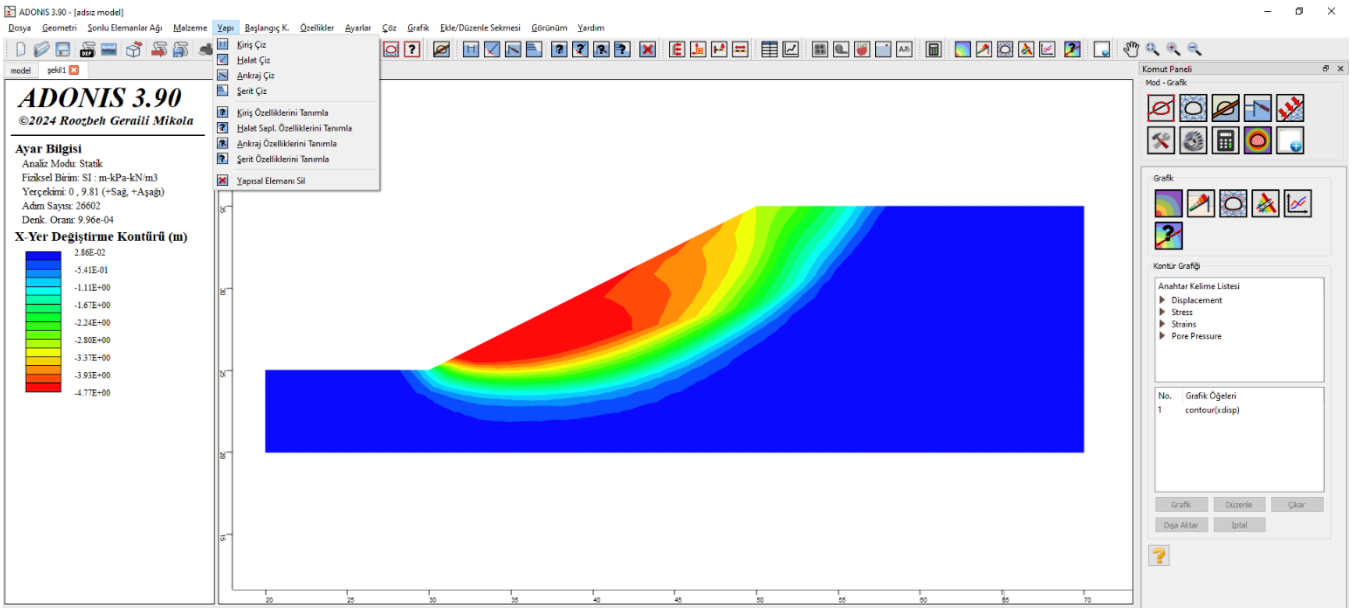
Ekler



Ek 1. ADONIS programı Türkçe başlangıç kullanıcı arayüzü



Ek 2. Analiz 2 için oluşturulan örnek geoteknik model tasarımı



Ek 3. Analiz 2 çözümlemesine ait yazılım sonuçları

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 1155-1170

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Derleme makalesi / Review article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

A review on strategies for minimizing cogging torque in flux-switching permanent magnet machines

Akı anahtarlamalı sabit mıknatıslı makinelerde vuruntu momentini en aza indirme stratejileri üzerine bir inceleme

Başak Tepretmez[1,*], Emrah Çetin[2]

[1,2] *Tarsus University, Electrical and Electronic Engineering Department, 33400, Mersin, Türkiye*

Abstract

Due to high volume of the studies in the field, flux switching permanent magnet (FSPM) machines are explored in this article. Particularly, this paper is examined the studies carried out to reduce cogging torque (CT) in FSPMs. The reduction of CT improves the smoothness and efficiency of electric machines, improving the effectiveness of control systems. In addition, the reduction in vibration and noise levels increases accuracy and reliability, particularly in sensitive applications. The research begins with a systematic examination of CT in FSPM machines. Through this analysis, certain parameters contributing to the mitigation of CT were determined, and relevant advancements from prior literature were thoroughly examined. Mostly, the structural changes were implemented by enhancing the rotor and stator to mitigate the CT. The rotor and stator efforts are discussed and classified in detail in this paper. These investigations substantiate the degradation in CT and the results make a significant contribution to the existing literature within the scope.

Keywords: CT, Flux switching machine, Optimization, Permanent magnet, Rotor/Stator

Öz

Bu alandaki çalışmaların yoğunluğu nedeniyle, bu makalede akı anahtarlamalı sabit mıknatıslı (AASM) makineler incelenmiştir. Bu makalede özellikle AASM'lerde vuruntu momentini (VM) azaltmak için yapılan çalışmalar incelenmiştir. VM'nin azaltılması, elektrik makinelerinin düzgünlüğünü ve verimliliğini artırarak kontrol sistemlerinin etkinliğini geliştirir. Buna ek olarak, titreşim ve gürültü seviyelerindeki azalma, özellikle hassas uygulamalarda doğruluğu ve güvenilirliği artırır. Araştırmalar, AASM makinelerindeki vuruntu momentini sistematik bir şekilde incelemesiyle başlamaktadır. Bu analizin sonucunda VM'yi azaltmayı amaçlayan parametreler belirlenmiş ve ilgili iyileştirme çalışmaları gözden geçirilmiştir. Çoğunlukla, yapısal değişiklikler vuruntu momentini azaltmak için rotor ve statoru geliştirerek uygulanmıştır. Rotor ve stator çalışmaları makalede ayrıntılı olarak tartışılmış ve sınıflandırılmıştır. Bu incelemeler VM'yi azaltmayı kanıtlamakta ve sonuçlar bu kapsamdaki mevcut literatürde önemli bir katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Vuruntu momenti, Akı anahtarlamalı makine, Optimizasyon, Sabit mıknatıs, Rotor/Stator

1 Introduction

Electric machines that enhance energy conversion through magnetic influences use the exchange of magnetic fields between permanent magnets (PMs) on the stator and the cogging, moving structure of the rotor. Flux-switching permanent magnet (FSPM) electrical machines operate through magnetic interactions between the windings and permanent magnets (PMs) on the stator, which generate a constant magnetic field, and the toothed, movable structure of the rotor [1]. A switching distinction between flux-switching permanent magnet machines and PM-assisted synchronous reluctance machines lies in the placement of the magnets; FSPMs incorporate the magnets within the stator and utilize a dual excitation system Figure 1 [2]. In such machines, the stator generates magnetic flux, and the rotor's capability to guide the magnetic circuit optimizes energy conversion through flux switching.

The design of FSPM machines (FSPMMs) is of paramount importance in the field of electrical engineering. Analyses conducted through finite element analysis (FEA) elucidate this significance further. FSPMMs are appealing for the electric machine designers due to the electromagnetic and electromechanical characteristics of it. Such as high-power density [3,4], high torque capability [5], primary topology on rotor [6], sinusoidal back electromotive force [7,8] etc. However, one of the consequences of this appealing profile, high CT occurs in FSPMs [9] and that needs to be handled. Thus, most of the researchers focus on the investigations into the mitigation of CT.

The most important challenge in FSPMM is CT, which effect out of magnetic influences among the rotor and stator at certain positions. Due to their dual salient structure, FSPMMs generate high levels of CT, leading to resistance in rotor rotation, increased vibration, and noise. These effects are particularly problematic in particular applications. To

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: 240929005@tarsus.edu.tr (B. Tepretmez)
Geliş / Received: 18.12.2024 Kabul / Accepted: 06.05.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1603645

improve performance and efficiency, reducing CT through optimized design and manufacturing processes is essential. [10]

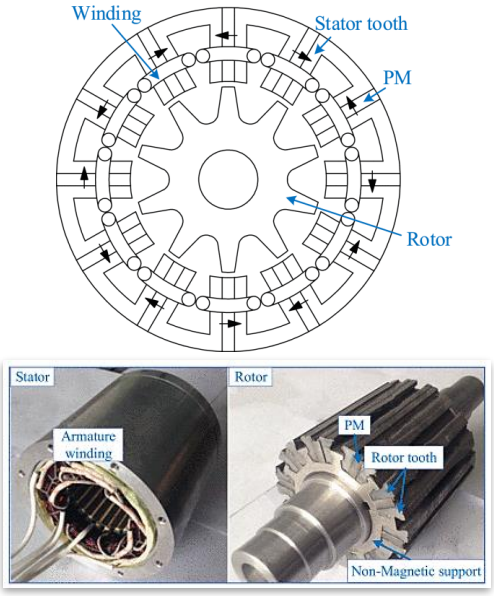


Figure 1. Conventional FSPM machine topology and the prototype [2]

The reduction of CT emerges as a critical objective for enhancing the performance, efficiency, and durability of electric machines. Relevant studies not only have the potential to improve machine performance by providing higher energy efficiency and longer lifespan but also contribute to the smoother management of machine dynamics. The resulting reduction in CT is considered a fundamental element for innovation and advancement in the field of electrical machines. Due to having the permanent magnets, the CT mitigation is very crucial for FSPMs.

Researchers have investigated numerous methods for reducing CT. Some of these methods focus on the stator side, such as magnet placement and design, as well as winding patterns [11,12]. Others are concentrated on the rotor side, including variations in rotor pole arc angles, widths, and shaping [13–17]. Many studies emphasize the combined effects of both the rotor and stator through various structural combinations [18–20]. In addition, some research has explored motor control strategies to mitigate CT. Various approaches based on harmonic current injection (HCI) and iterative learning control (ILC) have recently been proposed to compensate for and modulate the air gap flux density [21,22]. Moreover, topological changes such as increasing the number of phases have also been shown to effectively reduce torque ripple, which is closely associated with CT.

The studies on the CT mitigation reveal that magnetic interactions, structural design parameters, air gap configurations, and winding arrangements significantly effect the magnetic field and consequently the CT [23,24]. Each of these factors plays a pivotal role in the determination of CT, positioning them as critical elements that influence the generally execution of the machine.

In this study, the latest advances in approaches developed for the decrease of CT in FSPMMs are comprehensively examined. The paper is organized to provide a clear and systematic exploration of the topic. Section II begins with a detailed explanation of the analytical methods used to understand the mechanisms behind CT generation in FSPM machines, offering a foundation for the techniques discussed later. Following this, Section III presents an extensive review of state-of-the-art methods and strategies proposed for effectively reducing CT, highlighting their principles, applications, and potential benefits. Lastly, the conclusion section provides a summary of the findings and a critical discussion of the challenges, practical implications, and future directions for CT mitigation in FSPMMs.

2 CT Expression

2.1 Methodology

In this review, a comprehensive literature survey was conducted to identify and analyze various strategies developed to minimize CT in FSPM machines. The review focused on peer-reviewed journal articles, conference proceedings, and relevant academic sources published between 2005 and 2025.

Sources were selected based on their relevance to CT reduction methods in FSPM machines, including both analytical and experimental studies. Databases such as IEEE Xplore, ScienceDirect, and Google Scholar were primarily used to gather the literature. Keywords including "CT reduction", "flux-switching permanent magnet", "magnetic design optimization", and "machine topology modification" guided the search process.

The selected papers were categorized based on the type of technique they proposed—such as rotor/stator geometry modifications, magnet shifting, pole arc optimization, or auxiliary slot introduction. Comparative evaluations were also considered to highlight the strengths and limitations of each approach.

This methodology ensured a structured and focused review of the existing body of knowledge, enabling a well-informed discussion on the effectiveness and applicability of various CT mitigation strategies in FSPM machines.

The principles of working FSPM machines are interesting in view of magnetic flux orientation and torque generation. The CT generated in the FSPMM can be represented as the rate of the change of the magnetic co-energy with repaired the machine, as expressed in Equation (1), where α denotes the rotor displacement angle and has an active function in maintaining the torque creation of the machine.

$$T_{cog} = -\frac{\partial W}{\partial \alpha} \tag{1}$$

Here α symbol is the specify rotor position. As a result of the transmittance of iron core is considerably stronger than that of the air-gap and PMs, the magnetic co-energy W, can be exchanged with W_{gap}, deposited in the air-gap, thus the energy change in the iron core ignoring. [25]

$$W \approx W_{gap} = \frac{1}{2\mu_0}\int_V B^2(\theta)dV = \frac{1}{2\mu_0}\int_V B_r^2(\theta)G^2(\theta,\alpha)dV \quad (2)$$

Depending on the angle θ along the perimeter of the air gap depicted in Equation (2), the flux density delivery B(θ) along the air gap, the flux density delivery developed by the PMs at the stator is denoted by $B_r(\theta)$, and the impact of the prominent rotor on the flux density stator is denoted by G (θ, α). The Fourier expansion and analytical prediction of $B_r^2(\theta)$ for the real case are given in Equation (3) respectively.

$$B_r^2(\theta) = B_{r0} + \sum_{m=1}^{\infty} B_{rm} \cos m P_s \theta \quad (3)$$

The Fourier expansion of $G^2(\theta, \alpha)$ is given by:

$$G^2(\theta,\alpha) = G_0 + \sum_{n=1}^{\infty} G_n \cos n P_r(\theta + \alpha) \quad (4)$$

$$T_{cog}(\alpha) = \frac{\pi P_r L_{Fe}}{4\mu_0}(R_2^2 - R_1^2)\sum_{n=1}^{\infty} nG_n B_{r\frac{k_{mn}}{P_s}} \sin k_{mn}\alpha \quad (5)$$

L_{fe} here denotes the axial arrange distance, R_1 and R_2 indicate the outer radius of rotor and the inner radius of the stator in the same order. Where,

$$k_{mn} = nP_r \ \ or \ \ k_{mn} = nP_r = 2mP_s \quad (6)$$

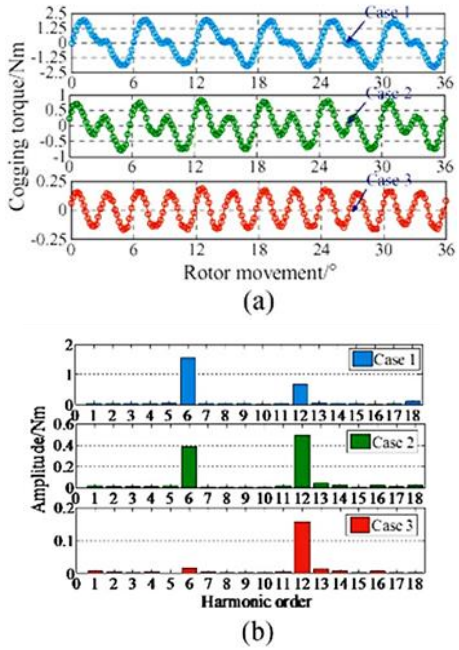


Figure 2. (a) CT waveforms, (b) harmonic order for three different cases [25]

As shown in Equation (5) the CT cycle generated within an individual rotor phase should include the smallest possible number of cycles. For instance, despite using the similar quantity of stator and rotor poles, CT has been calculated for three cases in the study [25]. As demonstrated in Figure 2, Case 1 shows the original configuration, whereas in Cases 2 and 3, PMs with reduced spacing and lower magnetic energy are employed. The waveform and harmonic structure of the CT for these three cases have been analyzed [25].

According to the Equation (5), Tcog can be reduced through the model of the stator or the rotor design. This mitigation can be achieved by using various methods, but most of them focus on the air gap permeance manipulation.

3 CT Reduction techniques

In this section, the methods used to reduce CT in FSPM machines will be examined, focusing on both rotor and stator components. It includes common improvements in rotor and stator designs to facilitate CT reduction through various optimization techniques and structural changes.

3.1 Rotor side adjustment

The rotor is the moving part of FSPM machines. There are various methods to reduce CT on the rotor side of FSPMMs. These methods include optimizing the rotor geometry [26], designing the rotor with axial skew [27], chamfering the rotor tooth tips [28], and segmenting the rotor slots [29]. These strategies support the effective minimization of CT through refinements in rotor configuration. The optimization techniques applied to the rotor side are summarized along with their corresponding references in Table 1 for clarity and comparison.

Table 1. Rotor side adjustments

ROTOR ADJUSTMENT	REFERENCE
3-D end effect and rotor eccentric, rotor optimization	[3,15,30,31]
Shifting rotor teeth, and stepped skewing rotor blocks	[16]
Rotor pole shaping, chamfering and flange rotor pole shape without skewing teeth	[7,27,32]
Teeth notching	[25,33]
Rotor pole width Rotor pole shape Rotor pole skew Rotor pole displacement Rotor dummy slot	[29,34]
Different arc angled rotor poles	[35,36]
Skewing, step-skewing, notching, pairing, right-angle chamfering and cos-chamfering rotors	[27,28,37]
Rotor position	[18,38]
External rotor	[39,40]
Different rotor tooth	[41]
Outer Rotor Structure	[42]

The author in study [35] the design of the Unequal Rotor Slot Arc (URSA), which investigates the effects of asymmetric rotor poles with distinct angles for a three phase FSPM machine. During the configuration process, an FSPM machine topology consisting of 12 stator poles and 10 rotor poles was selected. The results show that the unequal rotor slot arcs exhibit superior performance compared to the symmetrical design. The asymmetric schemes for the rotor slots were, simulated using parametric analysis to reduce the CT. Figure 3 illustrates the angle parameter in the parametric optimization process. To achieve optimization, two angles, θ_a and θ_b are defined, which can adjust the rotor pole as depicted in Figure 4. When equal rotor slot angles are accepted as zero, the unequal rotor slot angles are constrained between plus and minus two degrees to facilitate the optimization process. Additionally, an inequality is established for the two consecutive rotor poles, allowing the angles θ_{rs1} and θ_{rs2} to vary by ± 2 degrees. The proposed design shows a significant reduction in CT and shows a significant improvement.

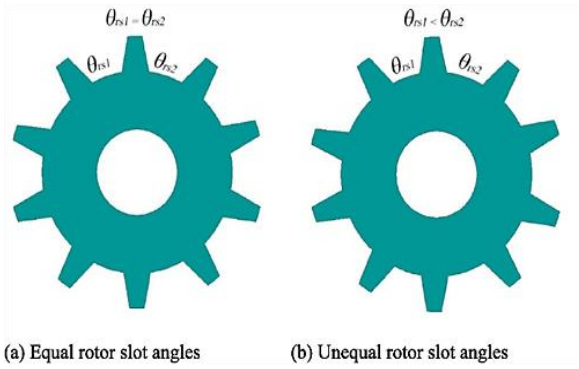


Figure 3. The configuration of the URSA method for FSPMs [36]

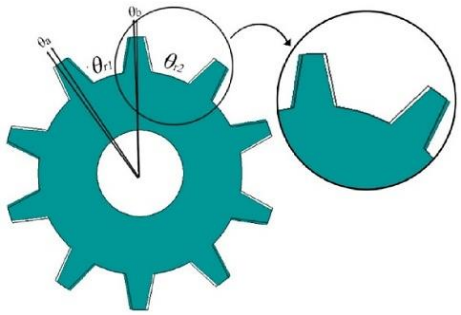


Figure 4. Unequal rotor slot angles method and optimization process angle parameters [36]

Five distinct angles have been selected to present the results in a comparative manner. The chosen angle parameters are detailed in Table 2.

$$\theta_{r1} = \theta_{rs1} \pm \theta_a$$
$$\theta_{r2} = \theta_{rs2} \pm \theta_b \quad (7)$$

Table 2. Chosen angle parameters after the FEA optimization process [36]

	θ_a	θ_b
Design 1 (D1)	1.2	-2
Design 2 (D2)	1.4	-1.8
Design 3 (D3)	-2	1.1
Design 4 (D4)	0.8	-2
Design 0 (D0)	0	0

The proposed design shows a significant reduction in CT and shows a significant improvement in [36]. Figure 5 highlights the impactivity of the URSA method in minimization CT, establishing it as a pioneering solution. According to the optimization and simulation results, D1 exhibits the lowest CT at 4.1% and also demonstrates a reasonable average torque loss. These findings support the assertion that the URSA method has significant potential for mitigating CT. Ultimately, the employment of unequal rotor slot arcs for FSPMMs allows satisfactory results to be achieved.

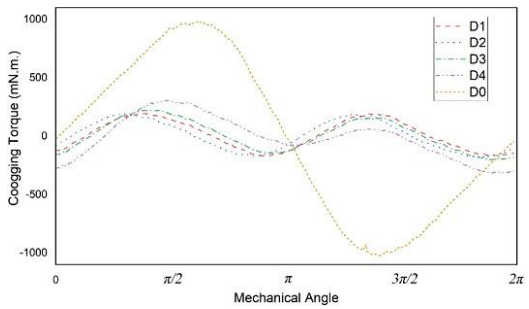


Figure 5. CT results [36]

Xiu et. al. proposed a new chamfered and flanged rotor pole geometry to reduce the CT without the use of sloping teeth [32]. The basic recommended dimensions of the rotor pole geometry have been optimized Figure 6. It shows the contribution of this pole shape to CT reduction by providing a more stepped change in the air gap opposition in the magnetic flux direction during rotor spinning. This impact of the method is confirmed by FEA and modeling based on practical examples. The influences of the offered pole configuration on the reverse electromotive force (EMF) and average electromagnetic torque are moreover studied. On a 6/4 pole FSPM machine, it is critical to reduce the CT to a certain low level to ensure the smooth machine operation. In this context, a chamfered and flanged rotor pole geometry without chamfered teeth is proposed. The proposed pole geometry is optimized by systematic techniques and FEA founded simulations, and the effectiveness of the approach is verified with empirical data.

In addition, the effects of this novel pole shape on the back EMF and the average electromagnetic torque are evaluated in detail. For a constant air gap distance, an unexpected alteration in air gap transmittance as the rotor pole side joins or exits the stator pole. But, in case of a larger air gap is added when the poles begin to overlap, this sudden change can be reduced. As the air gap length gradually

decreases, the air gap permeance changes more smoothly, lowering CT. For this reason, a chamfered rotor pole surface is recommended. This creates a gradual rise in the air gap from the center to the edge, allowing a smoother variation in air gap permeance. Accordingly, the circulation of $G^2(\alpha, \theta)$ down the perimeter of the edge rounding rotor pole area is displayed in Figure 6b [32].

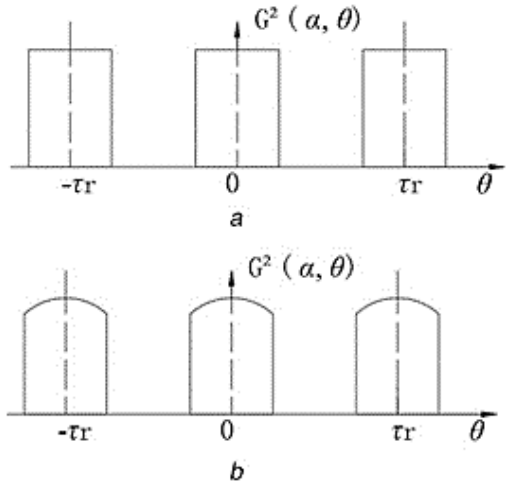


Figure 6. G(α,θ) distribution (a) Fixed air gap distance, (b) Edge rounding rotor pole surface [32]

In this study, a chamfered and flanged rotor pole design is presented in Figure 7. This design provides a further incremental change of air gap displacement in the flux linkage during rotor rotation, which results in lower CT.

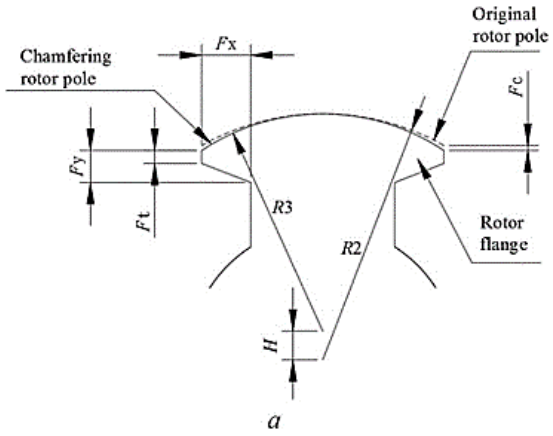


Figure 7. Suggested chamfering and flange rotor pole form [32]

To provide more analytical conclusions, the optimum dimensions of the flange thickness (F_x) and flange height (F_y) are considered using the Finite Element (FE) technique, which effectively allows to take into account for magnetic fullness and flux escape effects. As the FE study, the flange width (F_x) and flange height (F_y) are made equal, while the flange edge thickness F_t is kept at constant value. The simulation of FE analysis for the CT of the recommended rotor pole configuration with various chamfer magnitude and flange width dimensions are given in Figure 8.

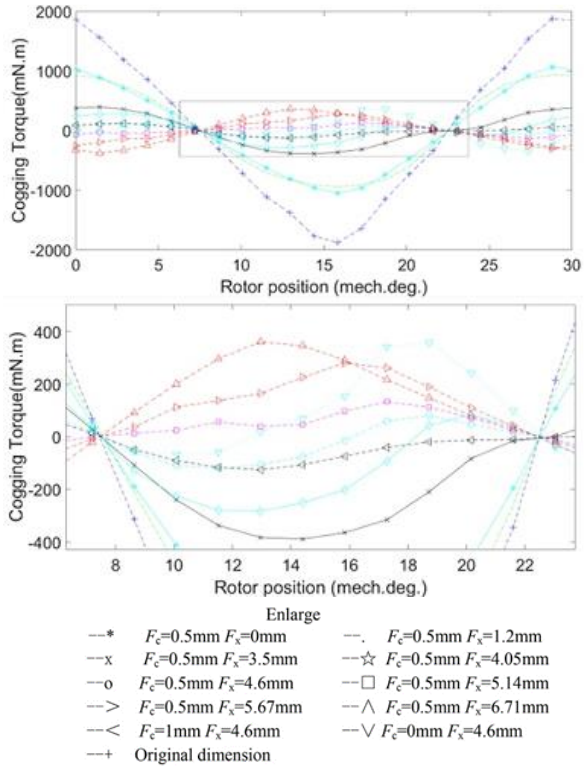


Figure 8. CT from the new rotor pole configuration by various scales of chamfer magnitude and flange width sizes [32]

Zhang et. al. [37] examine six rotor-side cogging suppression methods to improve the efficiency of FSPM machines. These methods include skewing, step-skewing, notching, pairing, right-angle chamfering and cos-chamfering rotors, as depicted in Figure 9. The skewed rotor technique [Figure 9(a)] reduces torque ripple by tilting the rotor core at a specific angle. The step-skewed [Figure 9(b)] rotor is a more effective version of this method. The notched [Figure 9(c)] rotor reduces harmonics causing torque ripple by adding notches to the rotor teeth. The paired [Figure 9(d)] rotor suppresses torque ripple by alternating rotor teeth of different widths, modulating the magnetic field. Right-angle [Figure 9(e)] and cos-chamfered [Figure 9(f)] rotor methods apply chamfers of different shapes to the rotor teeth tips to reduce torque ripple. While all these techniques minimize torque ripple, they also impact other performance factors like back EMF and torque. Therefore, the most suitable method should be chosen based on application requirements. Their robustness against manufacturing errors has also been considered.

Using FEA, the study predicts the effect of each technique on the CT waveforms of the FSPMM to assess the effectiveness of CT repression. Moreover, the outcomes of the methods applied to reduce the CT are demonstrated in Figure 10.

Furthermore, an overall theoretical analysis is conducted out to illuminate the common characteristics of cogging minimization techniques in FSPM machines. The observations contribute to a more integrated rotor structure methodology for researchers and designers in the field. In

addition, prototype experiments are carried out on a 12s/10p FSPMM utilizing four of the above rotor strategies. The observation of these experiments supplies important reference points for cogging suppression strategies applicable to FSPM machines.

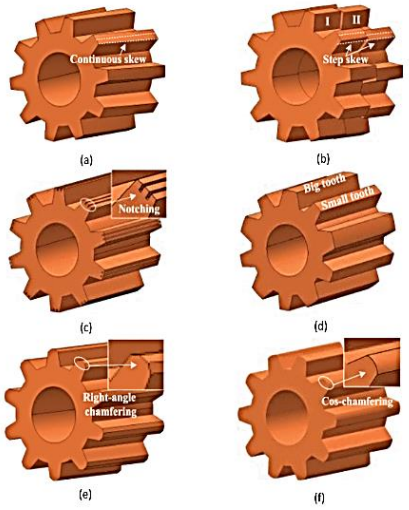


Figure 9. CT of the 12s/10p FSPMM with the rotors (a) continuous skew, (b) step-skew, (c) notching, (d) big/small tooth content, (e) right-angle chamfering, (f) chamfering [37]

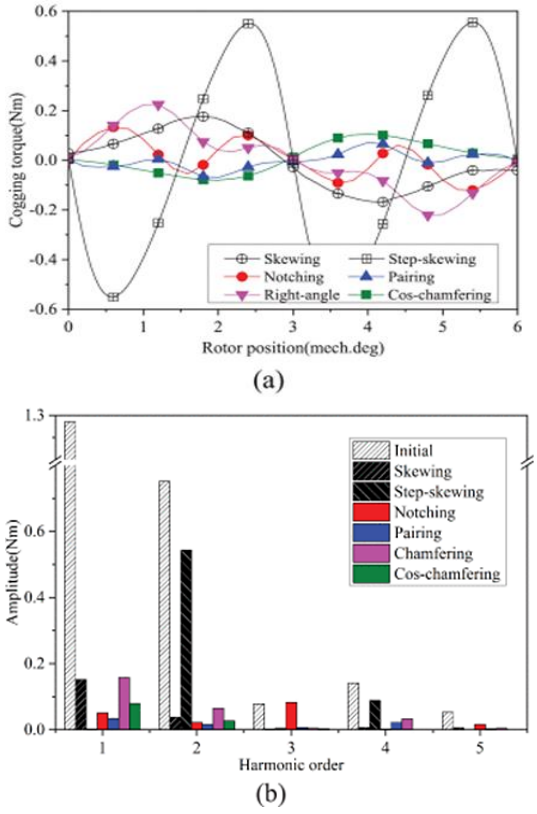


Figure 10. CT of the 12s/10p FSPMM with the rotors (a) CT waveforms (b) Harmonic analysis of the torque content [37]

3.2 Stator side adjustment

In this study, the latest advances in approaches developed for the decrease of CT in FSPMMs are comprehensively examined. The paper is organized to provide a clear and systematic exploration of the topic. Section II begins with a detailed explanation of the analytical methods used to understand the mechanisms behind CT generation in FSPM machines, offering a foundation for the techniques discussed later. Following this, Section III presents an extensive review of state-of-the-art methods and strategies proposed for effectively reducing CT, highlighting their principles, applications, and potential benefits. For ease of comparison and reference, these techniques along with their corresponding literature sources are systematically compiled in Table 3. Lastly, the conclusion section provides a summary of the findings and a critical discussion of the challenges, practical implications, and future directions for CT mitigation in FSPMMs.

Table 3. Stator side adjustments

STATOR ADJUSTMENT	REFERENCE
Different permanent magnet materials	[4]
Stator flux bridges Stator structure effects of short permanent magnets	[43,44]
Winding configuration	[23,45]
A new pole shaping	[46]
Distinct stator/rotor pole arrangements Winding arrangements and stator layering section forms	[47,48]
Dummy slot	[49,50]
Hybrid excited multi-tooth	[51]

Gan et. al. investigates the reduction of CT in three phase 12s/10p FSPMMs by examining the impact of compact permanent magnets and stator flux bridges (FB) in [43]. Four diverse FSPM configurations (outer/inner, inner/inner, inner/outer and outer/outer) Figure 11. were developed by adjusting FB placement and PM length. Through finite-element analysis, CT, output torque, and PM usage were compared across configurations. Experimental validation confirmed that the outer-inner structure effectively reduces CT and decreases PM material usage.

The segmented and modular design of the stator core complicates assembly. To make the stator more robust and reduce production complexity, a stator flux bridge (FB) can be included, consequent in a single-unit stator. Adding an FB not just minimizes manufacturing complication and creates a stronger stator arrangement but also helps alleviate CT presented in Figure 12, include two possible locations to situation stator FB: the inner aspect (there the FB is inserted next to the stator pole) and the outer aspect (there the FB is inserted next to the stator yoke). Furthermore, the width of the FB is a different significant determinant connected to efficiency.

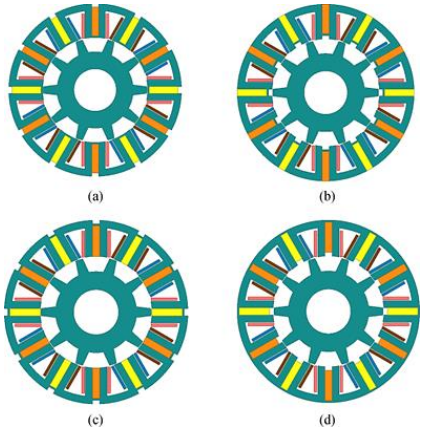


Figure 11. Finite element models of the proposed three-phase 12-slot/10-pole FSPM machines are illustrated as follows: (a) Inner stator with inner rotor, (b) Inner stator with outer rotor, (c) Outer stator with inner rotor, and (d) Outer stator with outer rotor, adapted from [43]

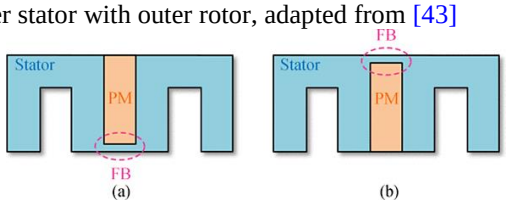


Figure 12. Location of the stator FB (a) Inner layer (b) Outer layer [43]

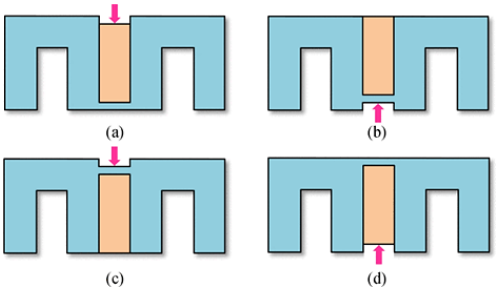


Figure 13. Four configurations of FSPM machines incorporating short permanent magnets and stator flux barriers are depicted: (a) Inner stator with inner rotor, (b) Inner stator with outer rotor, (c) Outer stator with inner rotor, and (d) Outer stator with outer rotor. [43]

Simulation results for CT in the inner/inner structure are presented for diverse PM dimensions illustrated in Figure 11(a) and 13(a). In such an arrangement, the stator FB is positioned on the inner aspect and the PM dimension decreases the inner axial axis. The result of the CT is illustrated in Figure 14(a).

Inner/outer structure is illustrated in Figure 11(b) and 13(b). This structure conclusion for CT is illustrated in Figure 14(b). Regarding this arrangement, the stator FB is included on the inner side, and the dimension of the PM is mitigated in the outer axial axis. When the PM dimension is mitigated to 17 mm, the peak significance of the CT decline to 40% of the 19 mm arrangement. Still, when the PM dimension is continuously decreased from 17 mm to 15 mm, only a slight decline in CT is detected. The CT with 17 mm PM dimension was diminished by 60% contrasted to 19 mm.

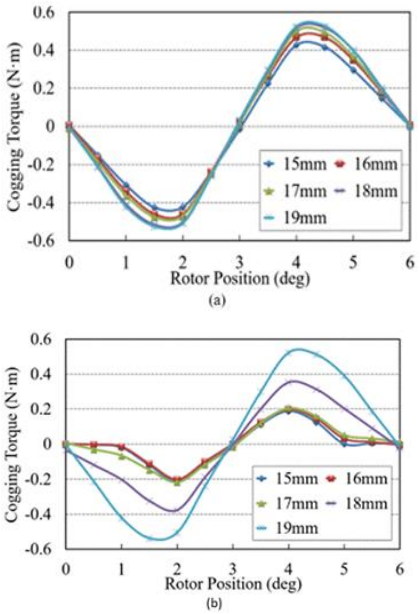


Figure 14. CT results a) CT illustration of the inner/inner structure b) CT illustration of the inner/outer structure [43]

The connection between CT and permanent magnet dimension in the outer/inner structure is illustrated in Figure 11(c) and 13(c). This structure outcomes CT is illustrated in Figure15(a). As the PM length decreases, the CT significantly reduces, reaching a minimum at a PM dimension of 15 mm. Reducing the PM dimension from 19 mm to 15 mm outcomes in a continuous diminish in average output torque; even so, this diminution is more limited compared to the inner/outer structure.

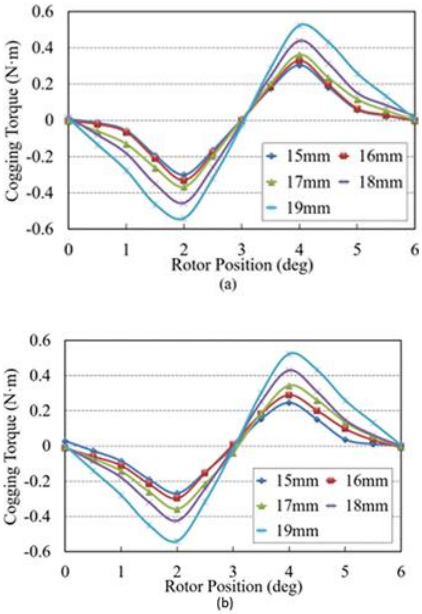


Figure 15. CT a) CT illustration of the outer/inner structure b) CT illustration of the outer/outer structure [43]

Within the outer/outer structure, the stator FB is included on the outer aspect, and the PM dimension is decreased to the outer axial bearing, as illustration in Figure 11(d) and 13(d). In this topology, the CT is displayed in Figure 15(b). As the PM dimension decreases, the CT declines. Additionally, in the topology with a PM length of 17 mm, the peak significance of the CT is minimized by 34% compared to the design with a PM dimension of 19 mm, although the torque loss is 13%.

Stator PM motors, especially FSPM dual salient PM, and flux inverted PM motors, are gaining increasing attention in various fields such as EVs [52,53], wind power transformation [54], and wave power transformation [55]. These motors share common structural features, such as the existence of PMs and core turns in the stator, and the rotor condition created as a basic iron core. These characteristics facilitate easy heat management of the PMs and provide a simple and robust structure for the rotor. Traditional stator PM motors utilize non-overlapping concentrated armature windings, resulting in low winding resistance and low copper consumption. However, this design has limitations in improving power density further. [45]

Du et al. [45] focused on the armature winding configuration pattern of FSPM motors (FSPMMs). In their study, the air-gap PM flux density of an existing 12s/10p FSPMM was analyzed, and a new 12s/7p FSPMM was proposed. Unlike the traditional non-overlapping concentrated winding, the new motor was designed with a distributed winding configuration to enhance torque density. The results were verified by calculating and analyzing the electromagnetic characteristics of both motors, and conclusions were drawn based on the findings.

Figure 16 demonstrates the configuration of a conventional 12/10-pole FSPMM, referred to as Motor I in this article. This motor's stator features essential teeth would with non-overlapping compact windings made from U-shaped layered parts, among which the permanent magnets are sandwiched, with their magnetic alignment courses configured alternately and adjacent in the tangential direction.

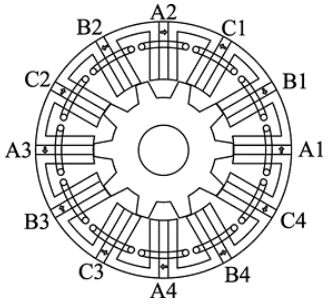


Figure 16. Motor I – 12s/10p FSPMM [45]

The winding factor of the motor designated Motor II displayed in Figure 17(a) will be quite low. Thus, with the aim of increase the power density, the distributed winding called Motor III shown in Figure 17(b) is preferred. Therefore, according to the proposed winding design method, there is only one type of winding configuration for 12/10 pole FSPM motors and two types of winding configurations for 12/7 pole FSPM motors.

The rotor also comprises of a basic iron core thought significant teeth.

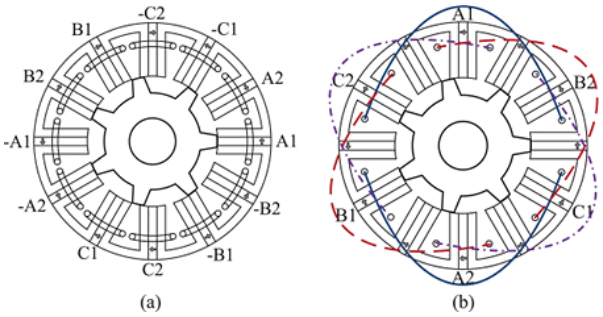


Figure 17. Armature winding connection of 12s/7p FSPMM. (a) Motor II-Classic non-overlapping winding (b) Motor III – Spread winding [45]

Displayed in Figure 18 are the CT waveforms for these motors. The peak to peak magnitude of CT for the 12s/7p FSPMM is 0.62 Nm as observed, which constitutes only 24.5% of the corresponding value for the 12s/10p FSPMM. This significant decrease in CT is one of the factors contributing to the reduced torque variation exhibited by Motor III.

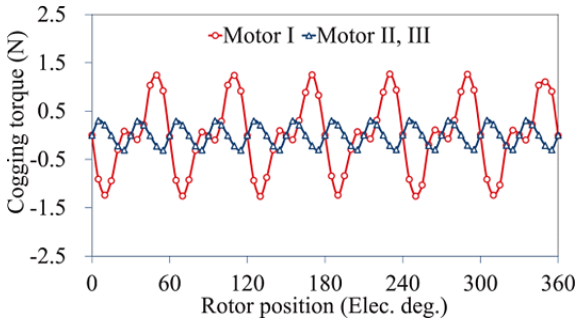


Figure 18. CT waveforms of three motors [45]

The use of distributed winding has been found to significantly boost the power density of the 12s/7p FSPMM contrasted to the motor with non-overlapping dense winding. Additionally, it has been observed that the 12s/7p FSPM motor exhibits a lower CT compared to its 12s/10p counterpart. However, the average value of the coil inductance of the 12s/7p FSPMM with distributed winding is more than four periods that of the other two motors. Finally, a prototype of a 12s/10p FSPMM was developed and evaluated. The trial outcomes, including the three-phase no-load EMF and three-phase self-inductance, have verified the outcomes derived from FEA and the investigative design.

Lan et al. [49], two surface-mounted PMSM prototypes with different magnetic loading levels were examined M1 (10-pole/12-slot, low magnetic loading) and M2 (12-pole/18-slot, high magnetic loading), as illustrated in Figure 19. The aim was to evaluate the influence of dummy slots on machine performance.

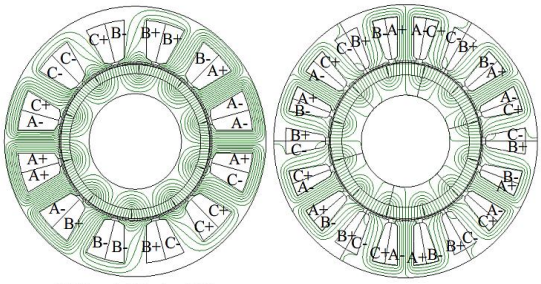


Figure 19. Stator winding configuration and flux path in the no-load state.[49]

According to the results, dummy slots impact not only the harmonic components of the CT but also the distribution of local forces on the stator bore. These effects stem from alterations in the air-gap flux density caused by the presence of dummy slots. The main goal of incorporating dummy slots is to reduce the amplitude of CT, considered a global force.

The paper presents a mathematical model for CT generated by real slots and extends it by formulating the additional torque contributions introduced by dummy slots. The total CT is defined as the sum of both components. Although certain harmonics can theoretically be cancelled through dummy slot placement, the cancellation is not perfect due to differences in the behavior of real and dummy slots.

In practice, one dummy slot was applied to each tooth in the M1 machine, and two were used in M2, as shown in Figure 20. This led to a notable reduction in the fundamental CT in both machines. However, some higher-order components increased specifically the 24th harmonic in M1 and the 18th in M2 (shown Figure 21).

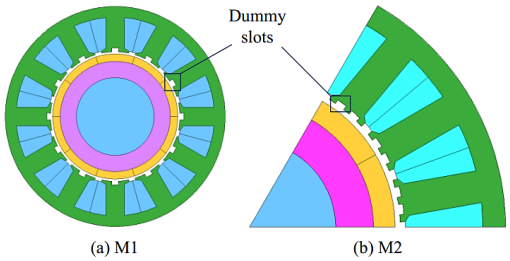


Figure 20. Electromagnetic finite element models of M1 and M2 incorporating dummy slots.[49]

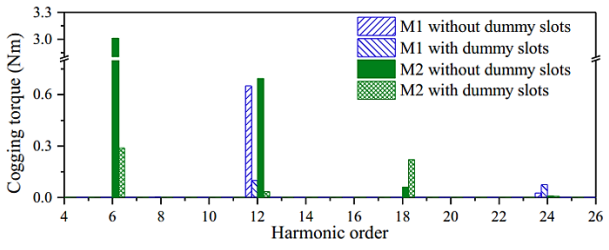


Figure 21. Spectral analysis. [49]

Overall, the study highlights how dummy slots alter CT harmonics and emphasizes their implications for noise and vibration performance.

In this study [50], Yokoi and Higuchi proposed and analyzed various techniques aimed at reducing CT in surface-mounted PM synchronous motors (SPMSMs). The first method presented involves an “Alternate Slot Winding” configuration, in which the windings and stator slots are arranged in an alternating pattern. This structure was primarily developed to suppress torque ripple components caused by back electromotive force (EMF). However, due to the irregular slot configuration, the frequency of CT is halved, which may, in turn, negatively influence torque ripple behavior.

To address this issue, the stator design with alternate slots was enhanced by the inclusion of "Dummy Slots," as illustrated in Figure 22. These dummy slots were constructed to replicate the magnetic reluctance distribution of the actual slots. As a result, they effectively suppress the lowest-order harmonic components of CT. The slot opening widths for both real and dummy slots were adjusted to be half the length of the slot pitch. This configuration enhances the presence of higher-order harmonics, thereby contributing to the reduction of torque ripple.

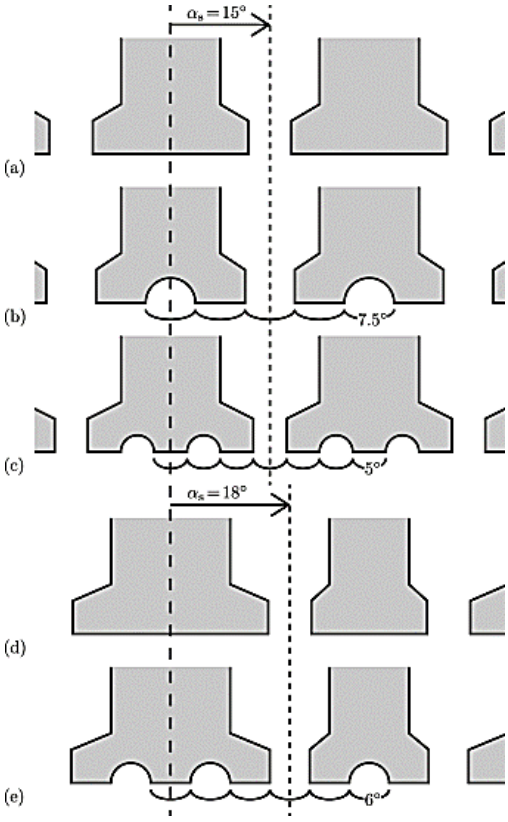


Figure 22. Illustrations depict the configurations of both actual and dummy stator slots for equal and alternate slot winding arrangements. The angular positions are presented in terms of electrical degrees. Specifically, subfigures include: (a) Equal Slot Winding with 24 slots (ESW24), (b) ESW48, (c) ESW72, (d) Alternate Slot Winding with 24 slots (ASW24), and (e) ASW60. [50]

Moreover, the rotor magnet design was considered alongside the stator structure. Two principal strategies were implemented to minimize torque pulsations. The first approach involved shifting the positions of the magnets on the rotor surface by a specific angle. This technique particularly aims to mitigate dominant CT harmonics, such as the 30th-order component. A theoretical expression was also provided to determine which harmonic component should be targeted for suppression. The second approach consisted of modifying the magnet arc width, primarily to attenuate undesirable back-EMF harmonics such as the 7th order. While this method primarily improves the EMF profile, it also contributes indirectly to the reduction of CT.

Ultimately, the study emphasized that effective CT reduction can be achieved through the combined application of multiple design techniques, each addressing different harmonic components, as demonstrated in the simulation results (Figure 23). The integration of alternate slot windings, dummy slots, and optimized rotor magnet arrangements was shown to significantly decrease torque ripple. The effectiveness of the suggested methods was confirmed through FEM analyses.

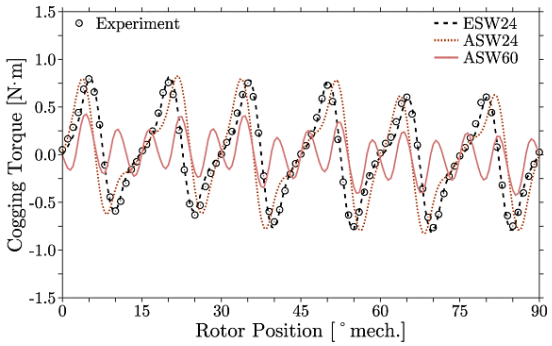


Figure 23. CT for ESW24, ASW24, and ASW60. [50]

In a study conducted by Zhu et al. [51], three innovative designs of hybrid excited multi-tooth flux-switching permanent magnet (HE-MFSPM) machines were proposed. These designs integrate the benefits of hybrid excitation with those of multi-tooth stator FSPMM's. While all three models operate on a similar principle, they differ significantly in the configuration of their stator structures.

As illustrated in Figure 24, Models I, II, and III feature hybrid excitation systems comprising tangentially magnetized permanent magnets and concentrated field windings (FWs). Model I stands out as the design utilizing the least amount of PM material, employing auxiliary slots and tangential magnets with opposing polarities. Model II incorporates radially magnetized PMs within the auxiliary slots and shares an equal PM volume with Model III. Notably, Model III enhances system reliability and modularity through the inclusion of six fault-tolerant teeth.

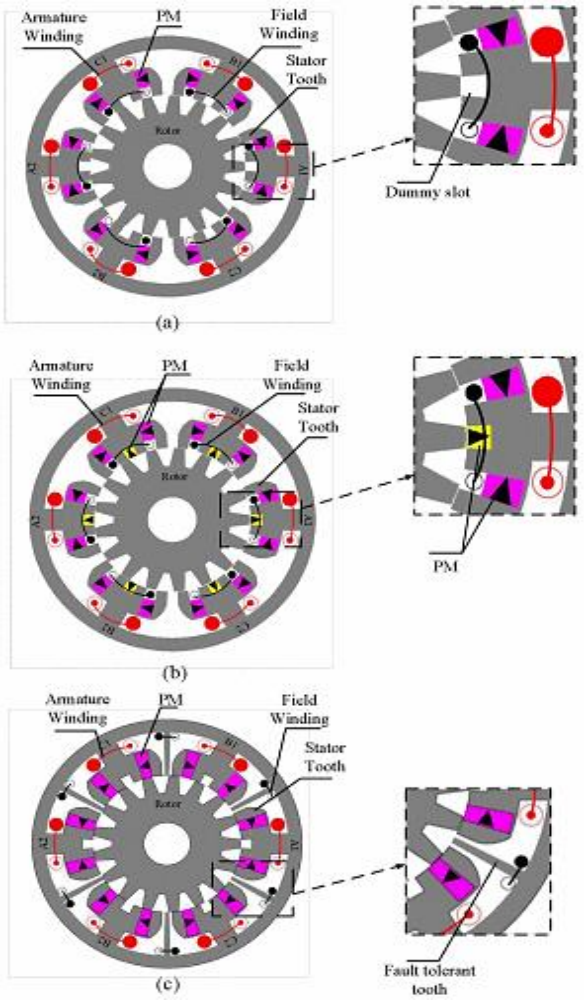


Figure 24. Structures of three HE-MFSPMM's. (a) Model I. (b) Model II. (c) Model III.[51]

To ensure effective flux control and mitigate the risk of demagnetization, all designs utilize a parallel hybrid excitation approach that separates the magnetic paths of PMs and FWs. Two-dimensional finite element analysis (2-D FEA) confirms that magnetic flux follows the intended excitation source when activated independently. The fault-tolerant structure of Model III, in particular, restricts inter-phase flux coupling, thereby improving phase separation.

The analysis demonstrated that all three HE-MFSPM configurations exhibit low CT characteristics. Among them, Model I achieved the minimum peak-to-peak CT, while Model III followed closely behind. Figure 25 presents the CT waveforms for the three machines, offering a comparative visual overview of their torque behavior. Overall, the study concludes that all models deliver favorable CT performance, with Model I emerging as the most effective in this regard.

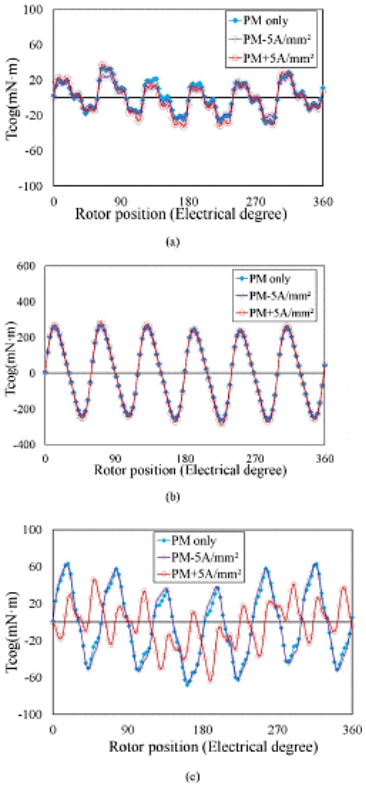


Figure 25. CT waveforms of three he-mfspm machines. (a) Model I. (b) Model II. (c) Model III. [51]

3.3 Rotor and stator side adjustment

In this section, the methods employed to minimize CT in FSPMMs will be examined, focusing on both rotor and stator components. Through various optimization techniques and structural modifications, improvements made collaboratively in the configurations of the rotor and stator support the mitigation of CT. A comprehensive summary of these methods, along with their related references, is presented in Table 4 to facilitate a clearer understanding of the applied strategies.

Table 4. Rotor and stator side adjustments

ROTOR-STATOR ADJUSTMENT	REFERENCE
tooth chamfering methods	[56]
Improvement of stator and rotor teeth	[17,57]
Slot-pole combination, stator-poles and rotor-teeth (P-T) combinations	[58,59]
Slot pitch of the stator and rotor, magnet arc, stator tooth arc, and stator yoke thickness	[60]
Rotor/stator configurations	[61,62,63]
Including arrangements of stator slots and rotor poles skewing angle stator tooth width rotor tooth width magnet thickness	[64,65]
cos-formed edge rotor (CSER), cos-formed edge stator, and dual cos-formed edge, air-gap field modulation	[66]

Zhu et. al. [56], various tooth chamfering methods are proposed to minimize CT for a 12/10 FSPMM. The effects of both round beads and correct angles, as well as their possible arrangements, on CT are examined using 2D FEA. The finding of the research show that using the right angles on both stator and rotor teeth is the most productive process. The combinations are illustrated in Figure 26.

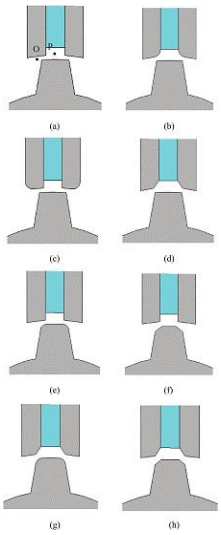


Figure 26. Various tooth chamfering configurations applied to both stator and rotor teeth are presented as follows: (a) Original design, (b) Stator tooth with a round fillet on the magnet side, (c) Stator tooth with a round fillet on the slot side, (d) Stator tooth with a right angle on the magnet side, (e) Rotor tooth with a round fillet, (f) Rotor tooth with a right angle, (g) Stator tooth with a right angle and rotor tooth with a round fillet, (h) Right-angled chamfering applied to both stator and rotor teeth [56]

In order to provide a clearer explanation of this phenomenon, an analysis of the flux density in the air gap has been conducted. Additionally, the effects on phase back electromotive force and electromagnetic torque have been thoroughly analyzed. The expected conclusions show that the suggested method can considerably reduce the peak value of CT from 2.6 Nm to 0.4 Nm, with only a 1.6% reduction in average torque. These findings represent a notable improvement when compared to approaches utilized in the previous literature.

First, the CT waveforms for the initial design of the 12/10 FSPMM, based on 2D-FEA, are displayed in Figure 27, where the peak torque magnitude reaches 5.2 Nm with a mechanical period of 6°. It is concluded that using a circular bead has very little effect on CT and that simply adding a circular bead does not reduce the torque. However, employing a right angle on the magnet section of the stator tooth lowers the torque partially. When examining the effects of the circular fillet and the right angle, it is determined that the CT in the rotor tooth can be considerably reduced with the right angle, that is more productive than the round bead. Comparisons of diverse configurations also indicate that the configuration utilizing both right angles provides the best solution.

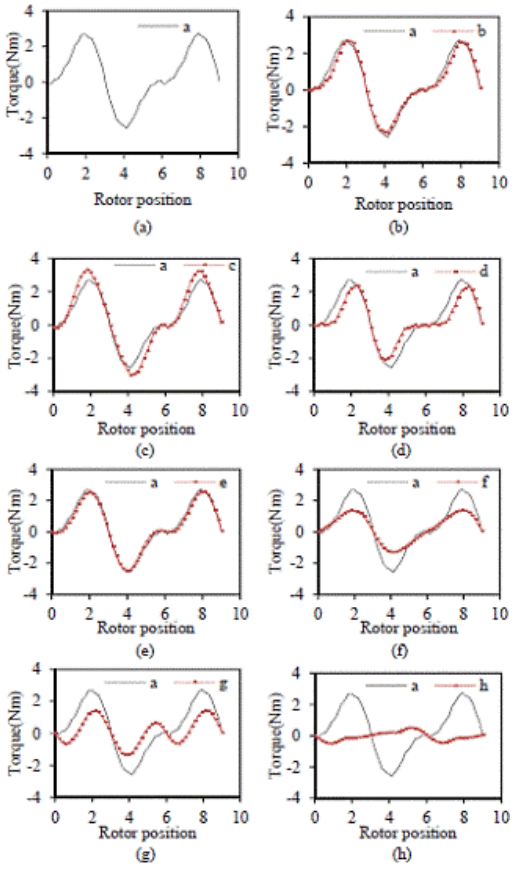


Figure 27. CT waveforms of diverse tooth-chamfering configurations. (a) Initial (b) round fillet in stator tooth/ magnet side, (c) round fillet in stator tooth/slot side, (d) right angle in stator tooth / magnet side, (e) round fillet in rotor tooth, (f) right angle in rotor tooth, (g) right angle in stator tooth / round fillet in rotor tooth, (h) right angles in both stator and rotor teeth [56]

In this section, the optimization studies carried out for the reduction of CT in the rotor and stator components of the FSPM electric machines studied are comprehensively discussed. These optimization processes include various design changes to refine the efficiency of the machine and diminish vibrations. The applications of the related optimizations are visualized with a detailed diagram in Figure 28.

4 Conclusion

A range of methods aimed at reduce CT in FSPM machines have been explored in this study. CT is an undesirable effect that occurs at low-speed operation of the motor and adversely impacts the overall performance of the system. The conducted analyses and implementations have demonstrated the effectiveness of the techniques used to minimize CT.

Among the methods examined are the optimization of magnet arrangement and modifications to the rotor and stator geometry. The combination of these techniques has significantly reduced the CT while contributing to have more stable operation and increased efficiency of the motor. In conclusion, the studies conducted to reduce CT are critically important for ensuring high performance and reliability in industrial applications of FSPMM. Future research is expected to contribute a significant advancement in this field through more innovative design and control methods.

Despite the progress in reducing CT through various design and control strategies, several challenges remain. One of the key difficulties lies in achieving optimal torque performance without compromising other machine parameters such as cost, manufacturability, and thermal behavior. Moreover, while many studies have focused on specific structural modifications, comprehensive comparisons across different mitigation techniques are still limited. In particular, there is a noticeable gap in the literature regarding integrated approaches that simultaneously consider electromagnetic, thermal, and mechanical aspects. Therefore, future work should aim to address these multidimensional challenges by combining advanced modeling techniques with practical validations.

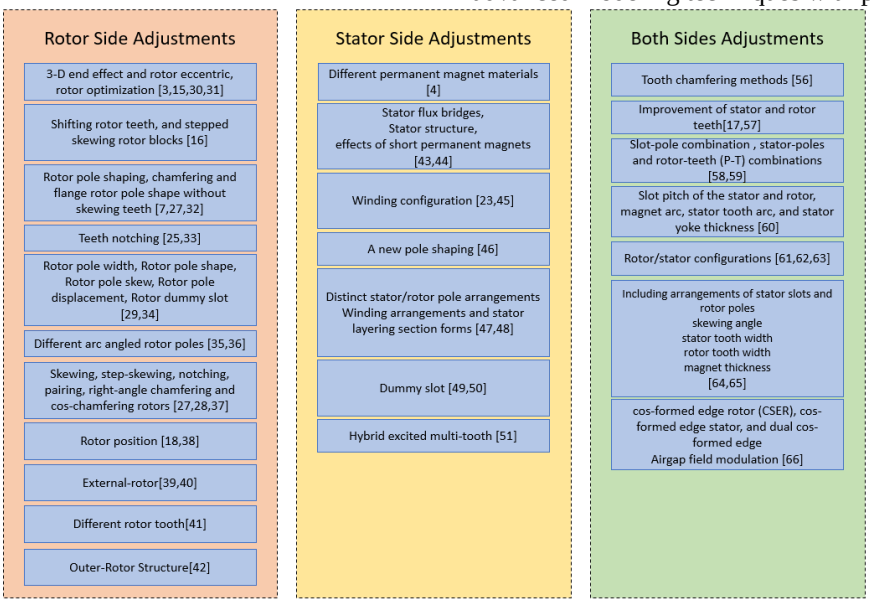


Figure 28. Classification of structural optimization techniques for CT reduction in FSPM machines

Acknowledgement

This work was supported by TÜBİTAK under project number 124E478. The authors would like to express their gratitude for the financial and technical support provided.

Conflict of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity Rate (iThenticate): 19%

References

[1] P. Svetlik, K. Hruska, Construction of the FSPM machine and its measurement in comparison with modeled results, 2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe), pp. 1-9, 2016.

[2] H. Chen, A. M. EL-Refaie and N. A. O. Demerdash, Flux-Switching Permanent Magnet Machines: A Review of Opportunities and Challenges—Part I: Fundamentals and Topologies, in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 35, no. 2, pp. 684-698, June 2020, doi: 10.1109/TEC.2019.2956600

[3] W. Hua, G. Zhang, M. Cheng, Investigation and Design of a High-Power Flux-Switching Permanent Magnet Machine for Hybrid Electric Vehicles, in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, no. 3, pp. 1-5, Art no. 8201805, March 2015. doi: 10.1109/TMAG.2014.2345732

[4] M. Taha, A. A. Saleh, A. Hemeida, Effect of Magnet Materials on Designing of a High Power-Low Voltage Permanent Magnet Flux Switching Motor for Automotive Applications, 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp. 2280-2286, 2020.

[5] Z. Xiang, L. Quan, X. Zhu, A New Partitioned-Rotor Flux-Switching Permanent Magnet Motor with High Torque Density and Improved Magnet Utilization, in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 26, no. 4, pp. 1-5, Art no. 5201905 June 2016. doi: 10.1109/TASC.2016.2514486

[6] L. Hao, M. Lin, D. Xu, W. Zhang, N. Li, Rotor design techniques for reducing the CT in a novel dual-rotor axial field flux-switching permanent magnet machine, 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 1581-1586, 2014.

[7] W. Hua, M. Cheng, Z. Q. Zhu, D. Howe, Analysis and Optimization of Back EMF Waveform of a Flux-Switching Permanent Magnet Motor, in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 23, no. 3, pp. 727-733, Sept. 2008. doi: 10.1109/IEMDC.2007.382817

[8] X. Zhu, W. Hua, Back-EMF waveform optimization of flux-switching permanent magnet machines, 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp. 2419-2425, 2016.

[9] Z. Q. Zhu, A. S. Thomas, J. T. Chen and G. W. Jewell, CT in Flux-Switching Permanent Magnet Machines, in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, no. 10, pp. 4708-4711, Oct. 2009. doi: 10.1109/TMAG.2009.2022050

[10] C. Sikder, I. Husain, W. Ouyang, CT Reduction in Flux-Switching Permanent-Magnet Machines by Rotor Pole Shaping, in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 5, pp. 3609-3619, Sept.-Oct. 2015. doi: 10.1109/TIA.2015.2416238

[11] I. Hussain, F. Khan, U. Zafar, N. Ahmad, N. Iqbal, CT reduction of flux-switching permanent magnet machine with overlapping windings, 2018 1st International Conference on Power, Energy and Smart Grid (ICPESG), pp. 1-6, 2018.

[12] Mengjie Shen, Jianhua Wu, Chun Gan, Yihua Hu, Wenping Cao, CT reduction in FSPM machines with short magnets and stator lamination bridge structure, IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 4307-4312, 2016.

[13] E. Cetin, Z. Q. Zhu, Optimization of Torque Performance of FSPM Machines by Rotor Pole Shaping using FEA and Genetic Algorithm, 2022 Second International Conference on Sustainable Mobility Applications, Renewables and Technology (SMART), pp. 1-8, 2022.

[14] J. H. Kim, Y. Li, E. Cetin, B. Sarlioglu, CT minimization with rotor tooth shaping in axial flux-switching permanent magnet machine, 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 1-7, 2016.

[15] J. Zhao, Y. Yan, B. Li, X. Liu, Z. Chen, Influence of Different Rotor Teeth Shapes on the Performance of Flux Switching Permanent Magnet Machines Used for Electric Vehicles, Energies 7, 8056-8075, 2014. doi:10.3390/en7128056

[16] X. Zhu, W. Hua, CT Suppression in Flux-Switching Permanent Magnet Machines by Superposition of Single Rotor Tooth, 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 4359-4366, 2018.

[17] X. Zhu, W. Hua, G. Zhang, Analysis and Reduction of CT for Flux-Switching Permanent Magnet Machines, in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, no. 6, pp. 5854-5864, Nov.-Dec. 2019. doi: 10.1109/TIA.2019.2938721

[18] A. Lindner, H. Kurtović, I. Hahn, Investigation of parametrized curves for the pole shaping in an E-core Flux-Switching Machine with large air-gap, 8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016), pp. 1-5, 2016.

[19] J. Zhao, Y. Zheng, C. Zhu, H. Chen and L. Yang, Torque ripple reduction of a modular-stator outer-rotor flux-switching permanent-magnet motor, IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 3765-3770, 2017.

[20] F. Yu, M. Cheng, K. T. Chau, Controllability and Performance of a Nine-Phase FSPM Motor Under Severe Five Open-Phase Fault Conditions, in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 31, no. 1, pp.

323-332, March 2016. doi: 10.1109/TEC.2015.2486521
[21] W. Huang, W. Hua, X. Zhu, Y. Fan, M. Cheng, Comparison of CT Compensation Methods for a Flux-Switching Permanent Magnet Motor by Harmonic Current Injection and Iterative Learning Control, 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp. 1971-1977, 2020.
[22] M. Cheng, P. Han, Y. Du, H. Wen, X. Li, A Tutorial on General Air-Gap Field Modulation Theory for Electrical Machines, in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 10, no. 2, pp. 1712-1732, April 2022. doi: 10.1109/JESTPE.2021.3055224
[23] Q. Ding, T. Ni, X. Wang, Z. Deng, Optimal Winding Configuration of Bearingless Flux-Switching Permanent Magnet Motor with Stacked Structure, in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 33, no. 1, pp. 78-86, March 2018. doi: 10.1109/TEC.2017.2752746
[24] P. Wang, W. Hua, G. Zhang, B. Wang and M. Cheng, Torque Ripple irradi Suppression of Flux-Switching Permanent Magnet Machine Based on General Air-Gap Field Modulation Theory, in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 69, no. 12, pp. 12379-12389, Dec. 2022. doi: 10.1109/TIE.2021.3137617
[25] D. Wang, X. Wang, S. -Y. Jung, Reduction on CT in Flux-Switching Permanent Magnet Machine by Teeth Notching Schemes, in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, no. 11, pp. 4228-4231, Nov. 2012. doi: 10.1109/TMAG.2012.2200237
[26] D. Xie, Y. Wang, Z. Deng, FSPM machines with twisted-rotor structure, 2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, pp. 1533-1538, 2014.
[27] W. Fei, P. C. K. Luk, J. X. Shen, B. Xia and Y. Wang, Permanent-Magnet Flux-Switching Integrated Starter Generator with Different Rotor Configurations for CT and Torque Ripple Mitigations, in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 47, no. 3, pp. 1247-1256, May-June 2011. doi: 10.1109/ECCE.2010.5618119
[28] S. M. K. Sangdehi, S. E. Abdollahi, S. A. Gholamian, CT Reduction of 6/13 Hybrid Excited Flux Switching Machine with Rotor Step Skewing, 2019 5th Conference on Knowledge Based Engineering and Innovation (KBEI), Tehran, Iran, pp. 582-586, 2019.
[29] L. Hao, M. Lin, D. Xu, W. Zhang, N. Li, Rotor design techniques for reducing the CT in a novel dual-rotor axial field flux-switching permanent magnet machine, 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 1581-1586, 2014.
[30] Z. Ma, M. Cheng, W. Yu, Y. Jiang, W. Hua, C. Zhao, Exploration of Rotor Topology Evolution Mechanism in the Stator-PM Machines, in IEEE Transactions on Industry Applications, 2024. doi: 10.1109/TIA.2024.3481398
[31] X. Zhu, Z. Xiang, C. Zhang, L. Quan, Y. Du, W. Gu, Co-Reduction of Torque Ripple for Outer Rotor Flux-Switching PM Motor Using Systematic Multi-Level Design and Control Schemes, in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 2, pp. 1102-1112, Feb. 2017. doi: 10.1109/TIE.2016.2613058
[32] J. Xiu, S. Wang, Y. Xiu, Reducing CT of 6/4 pole FSPM machine by optimising parameters of chamfering and flange rotor pole shape without skewing teeth, IET Electric Power Applications, 13: 277-284, 2019. doi:10.1049/iet-epa.2018.5435
[33] L. Hao, M. Lin, D. Xu, N. Li, W. Zhang, CT reduction of axial field flux-switching permanent magnet machine by rotor tooth notching, 2015 IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG), pp. 1-1, 2015.
[34] M. Liu, W. Sixel, H. Ding, B. Sarlioglu, Investigation of Rotor Structure Influence on the Windage Loss and Efficiency of FSPM Machine, 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Portland, pp. 6499-6505, 2018.
[35] E. Çetin, The Effects of the Unequal Rotor Slot Arc on CT for Flux Switching Permanent Magnet Machines, El-Cezeri Journal of Science and Engineering, vol. 11, no. 1, pp. 74–81, 2024. doi:10.31202/ecjse.1347168
[36] E. Cetin, CT reduction by utilizing the unequal rotor slot arc method for FSPM Machines, Ain Shams Engineering Journal, 2024. doi: 10.1016/j.asej.2024.103008
[37] Z. Zhang, P. Wang, W. Hua, T. Zhang, G. Wang, M. Hu, Comprehensive Investigation and Evaluation of CT Suppression Techniques of Flux-Switching Permanent Magnet Machines, in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 9, no. 3, pp. 3894-3907, Sept. 2023. doi: 10.1109/TTE.2023.3248220
[38] J. Zhao, W. Fu, Y. Zheng, Z. Chen, Y. Wang, Comparative Study of Modular-Stator and Conventional Outer-Rotor Flux-Switching Permanent-Magnet Motors, in IEEE Access, vol. 7, pp. 38297-38305, 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2890163
[39] W. Yu, K. Liu, W. Hua, M. Hu, Z. Zhang and J. Hu, A New High-Speed Dual-Stator Flux Switching Permanent Magnet Machine with Distributed Winding, in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 58, no. 2, pp. 1-6, Art no. 8102006, 2022. doi: 10.1109/TMAG.2021.3082931
[40] Zuo, Zijie, Yidong Du, and Lei Yu. Influence of Stator/Rotor Torque Ratio on Torque Performance in External-Rotor Dual-Armature Flux-Switching PM Machines Machines 12, no. 9: 588, 2024. doi: 10.3390/machines12090588
[41] P. Su, Y. Wang, Y. Li, W. Hua and Y. Shen, CT Reduction of Axial-Modular Flux Switching Permanent Magnet Machine by Module Combination Technique, in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 10, no. 1, pp. 1947-1956, March 2024, doi: 10.1109/TTE.2023.3262845.
[42] Z. Xu, M. Cheng and M. Tong, Design Consideration for E-Core Outer-Rotor Flux-Switching Permanent Magnet Machines From the Perspective of the Stator-Poles and Rotor-Teeth Combinations, in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 61, no. 1,

pp. 161-171, Jan.-Feb. 2025, doi: 10.1109/TIA.2024.3478173

[43] C. Gan, J. Wu, M. Shen, W. Kong, Y. Hu, W. Cao, Investigation of Short Permanent Magnet and Stator Flux Bridge Effects on CT Mitigation in FSPM Machines, in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 33, no. 2, pp. 845-855, June 2018. doi: 10.1109/TEC.2017.2777468

[44] X. Zhu, Z. Shu, L. Quan, Z. Xiang, X. Pan, Design and Multicondition Comparison of Two Outer-Rotor Flux-Switching Permanent-Magnet Motors for In-Wheel Traction Applications, in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 8, pp. 6137-6148, Aug. 2017. doi: 10.1109/TIE.2017.2682025

[45] Y. Du, F. Xiao, W. Hua, X. Zhu, M. Cheng, L. Quan, K. T. Chau, Comparison of Flux-Switching PM Motors with Different Winding Configurations Using Magnetic Gearing Principle, in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 52, no. 5, pp. 1-8, Art no. 8201908, 2016. doi: 10.1109/TMAG.2015.2513742

[46] C. Sikder, I. Husain, Stator vibration and acoustic noise analysis of FSPM for a low-noise design, 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Milwaukee, WI, USA, pp. 1-8, 2016.

[47] Z. Z. Wu, Z. Q. Zhu, Analysis of Air-Gap Field Modulation and Magnetic Gearing Effects in Switched Flux Permanent Magnet Machines, in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, no. 5, pp. 1-12, Art no. 8105012, 2015. doi: 10.1109/TMAG.2015.2402201

[48] A. Zohoori, A. Vahedi, M. A. Noroozi, Design study of FSPM generator with novel outer rotor configuration for small wind turbine application, 2014 14th International Conference on Environment and Electrical Engineering, pp. 275-279, 2014

[49] H. Lan, Q. Chen, J. Zou, Y. Xu, M. Wang and M. Liu, Influence of dummy slots on noise and vibration performance in permanent magnet synchronous machines, 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), Harbin, China, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/ITEC-AP.2017.8080970

[50] Y. Yokoi and T. Higuchi, Stator Design of Alternate Slot Winding for Reducing Torque Pulsation With Magnet Designs in Surface-Mounted Permanent Magnet Motors, in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, no. 6, pp. 1-11, June 2015, Art no. 8202911, doi: 10.1109/TMAG.2015.2394771.

[51] Z. Jin, X. Zhu, S. Chen, Z. Li and S. Ding, Comparative Study on Three Novel Hybrid Excited Multitooth Flux-switching Permanent Magnet Machines, 2022 Joint MMM-Intermag Conference (INTERMAG), New Orleans, LA, USA, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/INTERMAG39746.2022.9827848.

[52] K. T. Chau, C. C. Chan, C. Liu, Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no. 6, pp. 2246–2257, Jun. 2008. doi: 10.1109/TIE.2008.918403

[53] L. Mo, L. Quan, X. Zhu, Y. Chen, H. Qiu, K. T. Chau, Comparison and analysis of flux-switching permanent-magnet double-rotor machine with 4QT used for HEV, IEEE Trans. Magn., vol. 50, no. 11, Art. ID 8205804, 2014. doi: 10.1109/TMAG.2014.2331313

[54] J. Zhang, Z. Chen, M. Cheng, Design and comparison of a novel stator interior permanent magnet generator for direct-drive wind turbines, IET Renew. Power Generat., vol. 1, no. 4, pp. 203–210, Dec. 2007. doi:10.1049/iet-rpg:20070054

[55] M. Yu, W. Zhao, Y. Wang, X. Wang, Design and Optimization of a Novel Dual-Rotors Flux-Switching Permanent-Magnet Machine, 2020 IEEE 1st China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE), pp. 1-6, 2020.

[56] X. Zhu, W. Hua, M. Cheng, CT minimization in flux-switching permanent magnet machines by tooth chamfering, 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 1-7, 2016

[57] S. Çarkıt, N. Üstkoyuncu, T. Çarkıt, Investigation of the effects of magnet, stator and rotor geometries on torque and torque ripple in permanent magnet flux switched motor, Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 308-314, 2024. doi:10.29109/gujsc.1202243.

[58] D. Bobba, Y. Li, B. Sarlioglu, “Harmonic Analysis of Low-Stator-Slot and Rotor-Pole Combination FSPM Machine Topology for High Speed,” in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, no. 11, pp. 1-4, Art no. 8207104, 2015. doi: 10.1109/TMAG.2015.2446414

[59] Y. Shi, L. Jian, J. Wei, Z. Shao, W. Li, C. C. Chan, A New Perspective on the Operating Principle of Flux-Switching Permanent-Magnet Machines, in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 3, pp. 1425-1437, March 2016. doi: 10.1109/TIE.2015.2492940

[60] J. Zhu, L. Wu, H. Wen, “Optimization and Comparison of Dual-Armature Flux-Switching Permanent Magnet Machines with Different Stator Core Shapes,” in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 58, no. 1, pp. 314-324, Jan.-Feb. 2022. doi: 10.1109/TIA.2021.3131300

[61] Y. Gu, L. Quan, Z. Xiang, Minimization the torque ripple of flux-switching permanent magnet motor based on iterative learning control, 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 1985-1989, 2014

[62] Z. Zhang, P. Wang, W. Hua, T. Zhang, G. Wang, M. Hu, Comprehensive Investigation and Evaluation of CT Suppression Techniques of Flux-Switching Permanent Magnet Machines, in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 9, no. 3, pp. 3894-3907, Sept. 2023. doi: 10.1109/TTE.2023.3248220

[63] L. Zhu, S. Z. Jiang, Z. Q. Zhu, C. C. Chan, Analytical Methods for Minimizing CT in Permanent-Magnet Machines, in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, no. 4, pp. 2023-2031, April 2009. doi: 10.1109/TMAG.2008.2011363

[64] X. Zhu, W. Hua, Z. Wu, W. Huang, H. Zhang, M. Cheng, "Analytical Approach for Cogging Torque Reduction in Flux-Switching Permanent Magnet Machines Based on Magnetomotive Force-Permeance Model," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 3, pp. 1965-1979, March 2018. doi: 10.1109/TIE.2017.2739688

[65] Z. Gu, B. Zhao, R. Hu, X. Yin, X. Liu, Q. Zhang, J. Gong, N. Zhou, Y. Huang, "Electromagnetic Structure Research of the Modular Arc-Linear Flux Switching Permanent-Magnet Motor," 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 1857-1862, 2018

[66] P. Wang, W. Hua, G. Zhang, B. Wang, M. Cheng, Torque Ripple Suppression of Flux-Switching Permanent Magnet Machine Based on General Air-Gap Field Modulation Theory, in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 69, no. 12, pp. 12379-12389, Dec. 2022. doi: 10.1109/TIE.2021.3137617

NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(3), 1171-1184

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Derleme makalesi / Review article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

A review of collaborative strategies in last-mile logistics from an urban sustainability perspective

Kentsel sürdürülebilirlik perspektifinden son adım lojistikte iş birlikçi stratejilere yönelik bir inceleme

Fatmanur Özer[1,*], Neslihan Demirel[2]

[1] *Kafkas University, Sarıkamış Vocational School, Program of Logistics, 36500, Kars, Türkiye*
[2] *Kayseri University, Department of Industrial Engineering, 38280, Kayseri, Türkiye*

Abstract

In recent years, globalization, technological developments, and the growth of e-commerce transactions have increased the demand for logistics activities. Increasing demands affect logistics activities at all stages of supply chains, particularly the final stage, where delivery to customers occurs in urban areas. This stage, known as last-mile logistics, is not only the most expensive and inefficient part of supply chains, but also causes many problems, including increased freight mobility in urban areas, traffic congestion, parking issues, air and noise pollution, and carbon emissions. Reducing these economic and environmental costs is important for sustainable urban development. The sustainability of a city depends on its economic self-sufficiency, the living standards of its population under equal and fair conditions, and sensitive practices in environmental and waste management. Today, in addition to the traditional last-mile logistics practices of delivering the package to the customer's home/office, there are many new practices (delivery via parcel locker, drone delivery, robot delivery, micro-depot usage, urban consolidation center usage, pick-up/drop-off point, click-and-collect, crowd-sourcing, etc.) to overcome the mentioned drawbacks and manage the process more effectively and efficiently. Collaborative applications for these novel delivery methods are increasing day by day in order to minimize the costs of logistics service providers, facilitate customers' access to service, and thus improve customer satisfaction. In this study, we investigate different novel last-mile logistics methods in the literature and in practice that have been implemented with collaborative strategies. Among the 43 studies reviewed, urban consolidation centers, parcel lockers, and PUDO points emerged as the most frequently considered collaborative models. The advantages of the collaboration strategies and the barriers to their development are presented, and researchers, practitioners, and city managers are guided in developing new policies and strategies.

Keywords: Last-mile logistics, Crowd-sourcing, Collaboration, Review

Öz

Son yıllarda küreselleşme, teknolojik gelişmeler ve e-ticaret işlemlerinin büyümesi lojistik faaliyetlerine olan talebi artırmıştır. Artan talepler tedarik zincirlerinin tüm aşamalarındaki lojistik faaliyetlerini, özellikle de müşteriye teslimatın kentsel alanlarda gerçekleştiği son aşamayı etkilemektedir. Son adım lojistiği olarak bilinen bu aşama, tedarik zincirlerinin yalnızca en pahalı ve verimsiz kısmı olmakla kalmayıp, aynı zamanda kentsel alanlarda artan yük hareketliliği, trafik sıkışıklığı, park yeri sorunları, hava ve gürültü kirliliği ve karbon emisyonları gibi birçok probleme de neden olmaktadır. Bu ekonomik ve çevresel maliyetleri azaltmak sürdürülebilir kentsel kalkınma için önemlidir. Bir kentin sürdürülebilirliği, ekonomik olarak kendi kendine yeterliliğine, nüfusunun eşit ve adil koşullar altında yaşam standartlarına ve çevre ve atık yönetimindeki duyarlı uygulamalara bağlıdır. Günümüzde, paketi müşterinin evine/ofisine teslim etme şeklindeki geleneksel son adım lojistik uygulamalarına ek olarak, bahsedilen dezavantajları aşmak ve süreci daha etkili ve verimli bir şekilde yönetmek için birçok yeni uygulama (kargo dolabı ile teslimat, drone teslimatı, robot teslimatı, mikro depo kullanımı, kentsel konsolidasyon merkezi kullanımı, alma/bırakma noktası, tıkla ve topla, kitle kaynak kullanımı vb.) bulunmaktadır. Lojistik hizmet sağlayıcılarının maliyetlerini en aza indirmek, müşterilerin hizmete erişimini kolaylaştırmak ve böylece müşteri memnuniyetini artırmak amacıyla bu yeni teslimat yöntemlerine yönelik işbirlikçi uygulamalar her geçen gün artmaktadır. Bu çalışmada, literatürde ve uygulamada işbirlikçi stratejilerle uygulanan farklı yeni son adım lojistik yöntemleri araştırılmaktadır. İncelenen 43 çalışma arasında kentsel konsolidasyon merkezleri, kargo dolapları ve PUDO noktaları en sık ele alınan iş birliği modelleri olarak ortaya çıkmıştır. İş birliği stratejilerinin avantajları ve geliştirilmelerinin önündeki engeller sunulmakta ve araştırmacılara, uygulayıcılara ve şehir yöneticilerine yeni politikalar ve stratejiler geliştirmede rehberlik edilmektedir.

Anahtar kelimeler: Son adım lojistik, Kitle kaynak kullanımı, İş birliği, İnceleme

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: fatmanur.ozer@kafkas.edu.tr (F. Özer)
Geliş / Received: 20.04.2025 Kabul / Accepted: 17.06.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1680127

1 Introduction

With globalization, trade has become easier, and customers have the opportunity to shop without leaving their homes. More and more customers adopt e-commerce applications every year [1]. This situation leads to a change in the way businesses operate. The demand for urban freight transportation has increased significantly with the increase in the use of e-commerce and technological developments [2], and last-mile logistics has become a focal point for both academics and practitioners. Last-mile logistics is driven by increasing urbanization, population growth, e-commerce development, sustainability concerns, changing customer behaviors, and technological innovations. It can be explained as "the part concerned with the final stage of the supply chain from the final distribution center to the buyer's preferred destination". Last-mile logistics activities occur in the final stage of supply chains, typically in city centers, and directly impact the sustainability of urban areas. These activities contribute to the economy of city centers and the welfare of their inhabitants; however, on the other hand, they make it difficult to manage them in an environmentally friendly and effective manner. Therefore, e-retailers, local governments, and logistics service providers (LSPs) aim to lower the carbon footprint and expenses of last-mile logistics so as not to adversely impact the sustainability of cities. Since the last-mile is the most inefficient, expensive, and unsustainable part of the supply chain [3], it causes some externalities such as air and noise pollution, climate change, traffic congestion, accidents, and infrastructure wear and tear in the transport sector [4].

Recently, it has become increasingly common to apply collaborative strategies in last-mile logistics activities to reduce the mentioned externalities and economic and environmental costs. Collaborative strategies provide an appropriate tool to overcome the obstacles faced in last-mile logistics networks due to continued intense competition, very low profit rates, and changing environmental regulations. Collaborative practices in last-mile logistics can enable retailers to achieve triple profitability efficiencies and other business benefits [5]. Applying collaborative strategies is an emerging concept where LSPs temporarily lease assets to other providers, enabling sequential utilization of resources through leasing rather than ownership [6]. It offers many advantages to stakeholders. Besides the operational benefits, third-party organizations can facilitate collaboration by using information and communication technologies. In the context of last-mile logistics, collaborative use may manifest as shared physical resources, including delivery vehicles and courier services. Moreover, this approach can extend to the integration of non-traditional actors, such as volunteer pedestrians or vehicle owners, to supplement official courier networks.

The use of collaborative strategies in last-mile logistics activities has attracted the attention of researchers, practitioners, and policymakers in recent times because of its superiorities. Although many studies have been carried out in this field, there is a lack of review studies that can guide researchers for future research as well as help practitioners and policymakers in their decision-making. This study aims to reveal the studies that examine the strategies based on cooperation and sharing economy in last-mile logistics applications from different perspectives in the literature from the past to the present. The study seeks to answer the question of how effective collaborative practices are reducing the externalities from the perspective of urban sustainability in last-mile logistics. Further research is necessary to fully understand the potential benefits and challenges of implementing collaborative models in urban logistics systems. For this purpose, a comprehensive review of the relevant literature handling last-mile logistics operations with collaborative applications is presented. The aim is to explore how collaborative strategies are conceptualized and applied in last-mile logistics within the framework of urban sustainability. Although some previous studies, such as Silva et al. [1], have reviewed collaborative logistics in general terms, to our knowledge, no study has systematically classified these strategies based on their physical delivery infrastructure in the urban last-mile context. The study includes both systematic and bibliometric analysis approaches in order to take advantage of the superior aspects of both methods, as in the [7] that focused on autonomous vehicle storage and retrieval systems. The systematic literature review tools are used for an in-depth examination of collaborative approaches focusing on the shared use of facilities in last-step delivery activities, while bibliometric literature review tools are used for the general structure and visual and quantitative information on this topic.

2 Material and methods

This section presents the methodology adopted to carry out the proposed research. A literature review of studies about collaborative strategies in last-mile logistics from the perspective of urban sustainability is carried out with the aim of evaluating and integrating the studies related to the subject. Studies have been collected through an extensive search with electronic databases such as Scopus, IEEExplore, ScienceDirect, Researchgate, Web of Sciences and Google Scholar. Collaborative strategies involving the shared use of a physical space with stakeholders in the literature and practice applied in last-mile logistics activities are shown in Table 1. The strategies given in the table showing shared organizations are researched with words addressing cooperation, such as sharing, collaborative, crowd-sourcing, and crowd shipping when reviewing the literature. Visualizations were created using Microsoft Excel, Scimago Graphica, and The Free Word Cloud Generator.

Table 1. Collaborative Strategies and Associated Keywords for Last-mile Logistics Literature Review

Shared Facilities for Collaborative Strategies	Keywords
Urban Consolidation Center (UCC)	'sharing'
Micro Depot (MD)	'collaborative'
Micro Hub	'cooperation'
Collection Point	'crowdsourcing'
Collection and Delivery Point (CDP)	'crowd-sourcing'
Pick-up Point (PP)	'crowd shipping'
Pick-up Drop Off Point (PUDO)	'crowd-shipping'
Parcel Locker	'common'

This study aims to review the literature to answer the following three questions about collaborative strategies in last-mile logistics from an urban sustainability perspective:

- *RQ1*. How is the literature on the collaborative use of organizations in last-mile logistics structured?
- *RQ2*. What are the main trends in collaborative strategies in last-mile logistics from an urban sustainability perspective?
- *RQ3*. What might be future research options?

The most important research topics, authors, and academic studies that contributed to 43 fields published in the last 12 years were included and evaluated in this study. The data in the study were collected from conferences, peer-reviewed scientific journals, and book chapters. The aim is to provide a precise and comprehensive understanding of the concept of the sharing economy and the collaborative use of organizations in last-mile logistics. A meticulous literature review has been conducted to provide a summary of the existing literature and contribute to the creation and accumulation of information. In particular, Section 2 presents the research methodology, while Section 3 presents the examination of 43 studies on collaborative strategies in last-mile logistics between 2012 and 2024. The literature structure is based on different units of analysis such as authors, publication year, subject area, study location, publication journal or book. The literature review is based on keywords, titles, and abstracts, and identifies the main trends in collaborative strategies used in last-mile logistics. The main trends are organized around 8 physical areas.

The aim of the study is to identify a consistent publication example that addresses the sharing economy in last-mile logistics and collaborative work in the physical field in the literature review. The protocol started with 85 articles and resulted in a final dataset of 43 articles determined through a stepwise procedure [8];

- *Step 1 – database*. Studies have been collected through an extensive search with electronic databases. The focus was on studies included in Scopus, IEEExplore, ScienceDirect, Researchgate, Web of Sciences, and Google Scholar. They were tailored to examine interdisciplinary approaches in logistics and engineering.
- *Step 2 - topic choice.* To ensure relevance, keywords of the articles were searched for collaborative strategies that included shared organizations in their titles and abstracts, along with words that addressed collaboration, such as sharing, collaborative, cooperation, crowd-sourcing, common, and crowd shipping. (For example, sharing urban consolidation center and common parcel locker.)
- *Step 3 - additional topics.* Based on the definitions given in the introduction of the study, it was checked whether the terms "last-mile logistics" and "urban sustainability" were included in the studies.
- *Step 4 - type of publication.* The review was limited to academic studies such as journals, conference proceedings, book chapters and master's theses. In order to be consistent, it was preferred that the studies be conducted in English, the most commonly used language.
- *Step 5 - editorial choices.* No specific period, and no filter.
- *Step 6 - coherence*. In the study, missing citations and duplicate studies were eliminated. Several elimination criteria were determined. Studies with irrelevant abstracts, studies without abstracts, and studies with irrelevant titles and keywords were excluded from this study.
- *Step 7 – verification*. After the first 6 steps were applied, the abstracts of the remaining studies were read, and the eligibility of the studies was verified.
- *Step 8 - consolidation.* In order to ensure general integrity and relevance, all remaining works were read.

The results were created by reading the studies one by one and by a literature review based on textual data analysis. The analysis of the study used basic indicators such as authors, publication date, journal or book chapter, and the subject area. These indicators were used in quantitative measurements. After a thorough reading, four more papers were disqualified because they did not meet the selection criteria given in Table 2. Some of the excluded papers were used to provide information on the historical evolution of changes in last-mile logistics activities in cities, and the evaluation of the transport externalities, particularly in urban areas. The literature analysis provided quantitative results that shed new light on scientific research in the sharing economy, and collaborative work in organization in last-mile logistics. During the screening process, studies that did not involve collaborative strategies based on shared physical infrastructure were excluded. This includes publications focused solely on technical optimization (e.g., drone routing, autonomous vehicles, warehouse automation) without addressing stakeholder collaboration or shared facilities. In addition, studies set in non-urban, military, or humanitarian contexts were removed due to their lack of relevance to urban sustainability. The final selection included only those studies in which collaboration was explicitly tied to physical locations, such as parcel lockers, micro-depots, PUDO points, and urban consolidation centers. For instance, from the crowd shipping literature, only four studies that involved physical interaction points were retained for analysis.

Table 2. Inclusion and exclusion criteria adopted for the literature review

Inclusion Criteria	Exclusion Criteria
Full journal and conference proceedings	Lectures
English language	Non-English language
Peer-reviewed	Not peer-reviewed
Focus on last-mile logistics	Focus on the mobility of people
Focus on urban areas	Focus on rural areas
Focus on last-mile logistics externalities	Focus on all externalities
Focus on collaborative applications	Focus on individual application
Focus on studies in the last 12 years	Focus on studies before the last 12 years

In the initial search process, 85 records were identified across multiple databases. After duplicate removal and the application of inclusion/exclusion criteria, 39 studies were selected for full-text review. Subsequently, during thematic gap analysis, an additional targeted search was conducted to address underrepresented areas—particularly studies involving crowd shipping with physical delivery points. This led to the identification and inclusion of 4 additional studies, bringing the total number of reviewed articles to 43. The entire selection process is illustrated in a PRISMA-style flow diagram (Figure 1). From an initial pool of 85 studies, a series of exclusion steps based on relevance, duplication, and eligibility criteria led to a final dataset of 43 articles.

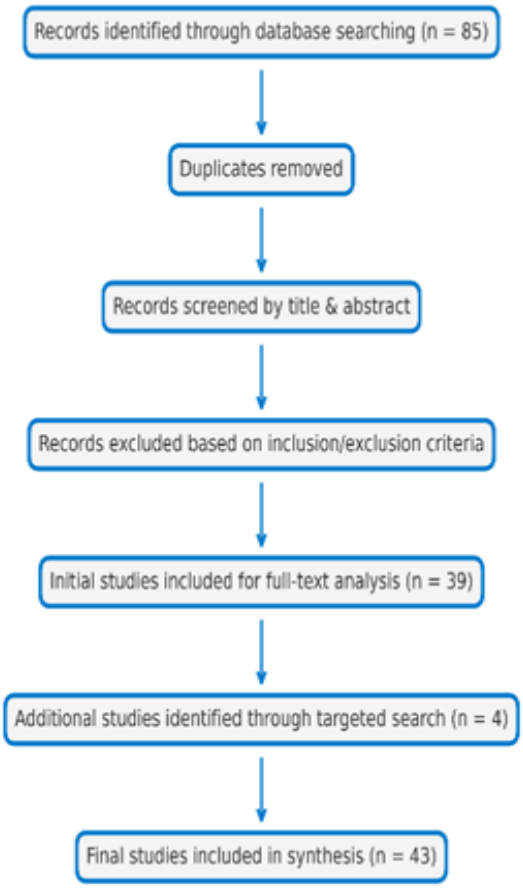


Figure 1. PRISMA-style flow diagram

3 Collaborative strategies in last-mile logistics

One of the biggest challenges in last-mile logistics is that distribution centers are far away from destination points, and demand points in urban areas are in extremely dense areas [9]. Collaborative strategies can improve cost efficiency to solve the challenges in last-mile logistics. They can also play an important role for LSPs in reducing environmental externalities within urban areas as well as increasing efficiency in delivery [10]. The main concept of the collaboration strategy is to use the resources, vehicles, infrastructure, and physical spaces in a common way within the urban area for last-mile logistics operations with the aim of advantages such as increasing the efficiency of delivery within the city, better use of resources, management, and investment cost savings [4]. In this study, only the common use of organization in a collaborative manner in last-mile logistics is focused on. In addition, last-mile logistics studies in which both organizations use collaboratively and crowd shippers use collaboratively are also included in this scope. The studies on these special areas, which are located close to or in city centers and used with a collaborative approach, are grouped and explained in the following sections.

3.1 Urban consolidation center (UCC)

An UCC is defined as a logistics facility that serves an entire city, a specific district, or a more specific area (e.g. a shopping mall) and is generally located on the urban fringes, relatively far from the city center [11]. This facility includes a wide range of value-added services such as temporary storage, handling, sorting, classification, and load consolidation. The main purposes of using the UCC can be stated as reducing the number of commercial vehicles entering the urban area and increasing operational efficiency by turning partial loads into consolidated loads at the last-mile step [12]. Another important aim of UCC can be expressed as helping to reduce urban environmental externalities by making up the vehicle fleet, which is distributed from the facility to the city center, mostly from environmentally friendly vehicles that work with electric and natural gas [13]. Although the main actors using the UCC are often LSPs, a specialized consolidation center structure for retailers and shippers can be practiced [11]. UCCs are integrated into the city, mostly by local public authorities as a legal obligation; however, it can also be seen that they are used by companies to provide a competitive advantage. Studies in the last-mile logistics literature where UCCs are handled with collaborative strategies involving the joint use of different stakeholders are mentioned below.

Roca-Riu et al. [14] proposed a strategy that supports cooperation between freight carriers through the use of UCC to reduce operating costs in urban distribution. The system without a consolidation center was compared with the proposed system. With the results obtained, the benefits such as savings in time, distance, cost, and environmental externalities by using UCC were emphasized. Battaia et al. [15] presented a methodology for estimating the activity level of collaborative networks using the example of UCC. The study was conducted using real cases and used game theory and operational research techniques. This study was tested in Saint-Etienne, France. Roca-Riu et al. [16] examined the logistics cost savings of UCC when implemented in a dense area of the city. In the UCC strategy, freight flows from intercity carriers were consolidated and transferred to the last-mile carrier to consolidate final deliveries with the goal of decreasing the last-mile fleet size and average distance cost. The model, which was created in the study, focused on continuous analytical models for the general situation of carriers with different market shares. Handoko et al. [17] conducted a study on collaborative urban logistics in Singapore. The study recommended the use of the UCC, like the Tenjin Joint Distribution System in Fukuoka Japan. Privacy protection and cost reduction have made carriers look favorably on consolidating last-mile

deliveries. The auction mechanism is proposed to maximize the cost savings achieved by carriers by combining their orders. In the proposed model, last-mile logistics in urban areas was seen to care about the people, the planet, and profitability. Paddeu [18] investigated the experiences of retailers using shared UCC established in Bristol in 2002. The study was conducted at the Bristol-Bath Urban Consolidation Centre, which provides services for electric vehicles. The study assessed the benefits of shared last-mile freight services by focusing on the perspectives of retailers using shared UCC. Gonzalez-Feliu et al. [19] studied resource sharing and multi-stakeholder collaboration. They determined the complexity of the stakeholders that will collaborate. The study focused on UCC to be used for collaboration, partnerships in transportation, collaborative decision making, multi-stakeholder collaboration and its barriers, urban congestion and traffic forecasting. As a result, the study aimed to add value not only to theoretical aspects but also to methodological and technical issues. The study proposed by Hezarkhani et al. [20] includes a model for collaboration in UCC. The authors examined collaboration cases involving several carriers with time-sensitive deliveries that can consolidate their cargo to save money. The class of dispatch consolidation game was introduced, and efforts were made to distribute savings fairly among carriers. The UCC operator had solved a selection and dispatch problem to maximize the total savings of players in the system. Nataraj et al. [21] analyzed different scenarios where both the location of UCCs and players in different supply chain processes simultaneously exhibit various levels of cooperation. The low collaboration situations where all decisions were made in a decentralized way and also where warehouse capacities were shared but customers were still served by each company's vehicle fleet; semi-cooperative situation based on centralized route planning decisions; fully collaborative situation where routing plans, and facility location decisions were made through collaboration among all participants were considered as different scenarios. A metaheuristic algorithm was proposed to address the combined location and routing problem under different collaborative scenarios to estimate the benefits of strategies. The results show the benefits of the proposed algorithm. Gatta et al. [22] investigated the feasibility of out-of-hours deliveries in Rome. The analysis of the study was created both by face-to-face interviews and multi-criteria decision making. The results of the study revealed that stakeholders wanted to make out-of-hours deliveries using more than one UCC. The study showed that stakeholders wanted to make this out-of-hours delivery, which would be done collaboratively, in a heterogeneous way. And lastly, Kaspi et al. [23] conducted a study focusing on changes in business models, such as urban micro-consolidation centers, crowd-sourcing logistics, and vehicle autonomy. The study also explored literature on some of the UCCs sharing space with retail businesses in the city.

3.2 Micro-depot (MD)

MDs are places where LSPs take the packages from here to transport to the final consumer, where loading, unloading, sorting, storage, and delivery are carried out. It is usually located near or within an urban area. MDs have been used by large LSPs since 2010 [24]. Moreover, MDs can be mobile or fixed in cities [25]. An MD is used for storage in the form of a usable property in an urban area or as a transfer in a container. The location of the establishment of MD is important. MD should be suitable for the use of cargo bikes and walking couriers and should be located close to customers. However, the supply vehicle must also comply with the infrastructure conditions to deliver to the MD without creating congestion. Parcels are supplied from a central warehouse to MD with a single vehicle and delivered to customers from MDs on foot, by cargo bike or by electric vehicles. Customers also have the opportunity to come and pick it up [26]. The studies in the literature addressing the problem of using MDs with a collaborative approach since 2012 are described below.

Rosenberg et al. [24] proposed the idea of a shared MD network with parcel lockers by expanding existing MD networks. This shared network idea optimized the use of urban space while minimizing the individual cost of LSPs. The study examined the use of shared networks in the cities of Helmond and Helsinki as a case study. In addition, it provided a framework for ancillary businesses that could benefit from this shared network. The success criteria for shared networks were determined considering sustainable goals. Hörsting et al. [27] introduced the idea of integrating freight deliveries with existing public transport infrastructures such as light rail. This study considered a shared public transport stop used for transfers, which acts as an MD with limited storage capacity. The system proposed a large neighbor search algorithm to calculate the sensitivity to the capacity of the MDs and vehicles. Alejandra Maldonado Bonilla et al. [28] developed a taxonomy that enables the design of the last-mile logistics network to investigate the reasons for failures in sustainable last-mile delivery. A systematic literature review was used to collect data in the study. The study contributed to the understanding of the last-mile logistics network and provided sustainable strategies. According to the results of the study, the importance of the implementation of shared MD, electric vehicles, collection and delivery points was presented.

3.3 Micro-hub

Micro-hubs are locations within cities where shipments are classified and delivered to customers using emission-free methods such as cargo bikes [29]. It can be used as a PUDO point for online shopping. Customers can pick-up products brought to the nearest micro-hub by local stores in a short time [30]. Below is a description of the research that has been done from the past to the present on the issue of employing micro-hubs collaboratively.

Hribernik et al. [31] considered joint micro-hubs and horizontal collaboration as a solution to the last-mile distribution problem experienced in the courier, express, and parcel (CEP) industry. However, they thought that the data exchange and trust problem between CEP carriers could be solved by blockchain decision technology and presented a blockchain decision framework. In another study done in

2020, Ballare et al. [32] compared the performance of crowd shipping with micro-hub delivery approaches with the performance of traditional delivery. The crowd shipping with the micro-hub delivery method proposed in the study aimed to reduce operating costs, fuel consumption, and the number of delivery vehicles and crowd shippers. Ackva et al. [33] proposed collaborative distribution within cities using shared vehicles and micro-hubs for same-day delivery. Consistent routes between micro-hubs increase trust among stakeholders and facilitate distribution. Shared vehicles deliver the product from the store to the micro-hub closest to the customer. In doing so, a two-stage stochastic model is proposed for planned same-day delivery. The first stage determines vehicle schedules, while the second stage optimizes the order flow. According to the analysis, costs have decreased.

3.4 Collection point

One of the alternative places used to reduce the costs in last-mile delivery is the collection point. Collection points can be set up in frequently visited locations without adding additional travel costs [34]. Collection points are used in operations in the goods distribution process at the micro level [35]. Information on the studies conducted in the literature on the collaborative use of collection points is given below.

Pan et al. [36] based on the concept of crowd-sourcing and physical internet to collect returned goods within the framework of sustainability. It aimed to transfer e-commerce returns from final consumption points to retailers by taking advantage of continuous mobility and the extra loading capacity of taxis. On the one hand, e-retailers would have the opportunity to outsource this task; on the other hand, taxi drivers would be motivated to earn money from this extra shipment. This study used open databases of store locations in a large city in China and taxi GPS data. Two collection strategies were proposed with an optimization-based simulation model, and their feasibility was evaluated from a managerial perspective. De Meyer et al. [37] investigated the impact of two collaboration strategies within the "Rural Parcel Delivery" project. The first is the outsourcing of parcel delivery to a neutral third party using a common distribution center. The second is the establishment of a shared collection point between carriers. A parcel delivery chain model was developed to evaluate the effectiveness of this collaboration strategy. The study was conducted in the Walloon region of Belgium and resulted in a 60% reduction in carbon emissions and a 35% reduction in costs.

3.5 Collection and delivery point (CDP)

CDPs are third-party locations that provide delivery and pick-up of products purchased by customers online [38]. The CDP concept was developed to take precautions against unsuccessful deliveries. Grocery stores, post offices, and gas stations can be designated as CDPs for customers to receive deliveries [39]. The studies in the literature handling the problem of using CDPs collaboratively since 2012 are described below.

Collins [40] investigated customer evaluation of CDP usage, through a survey, and estimated a random parameter error component logit model. The CDP locations examined went far beyond traditional delivery methods, including CDP modes and ways in which collection, and delivery could be integrated into existing trips. Integrating CDP with walking, cycling, and driving and using it collaboratively had been shown to significantly reduce environmental impacts. Wang et al. [41] established sustainable vehicle routing optimization to adopt a cooperative strategy and multiple shared usage among logistics networks. They constructed a multi-center vehicle routing problem with simultaneous pick-up and drop-off to reduce operating costs and vehicle count. It was envisioned that the pick-up and delivery points would allow the network to share vehicles and customers to improve efficiency and maximize profit. K-means and Non-dominated Ranking Genetic Algorithm-II were combined and used to solve the vehicle routing problem using shared pick-up and delivery points. Akeb et al. [42] proposed a collaborative approach to collect, and distribute products from CDPs using neighbors. In this study, the number of crowd shippers (neighbors) and the number of packages needed were tried to be estimated. The case study was done in the 12th district of Paris. The proposed system worked with a reward mechanism, and the results encouraged the implementation of the collaborative system. Mancini et al. [43] proposed a hybrid delivery model that innovatively combines traditional home delivery and shared delivery points. For each customer who had chosen a shared delivery point, the company paid compensation if the service quality was perceived to be reduced. Two mathematical models were proposed for this decision problem. When the researchers conducted a comprehensive case study, they found that the shared delivery point model outperformed the traditional home delivery model. Lastly, Li et al. [44] wanted to examine the CDP network sharing strategy of express companies with CDP networks, which is a new sharing mode in last-mile delivery. Based on this, they examined express companies with CDP networks and express companies without CDP networks. It was always beneficial for the CDP provider for companies with CDP networks to share this network. However, interestingly, this sharing mode, which provides so many advantages, was harmful to the CDP user. Therefore, the study suggested that the company that is the CDP provider can offer usage fees that increase the incentive for shared use. As a result of the study, even if CDP sharing had negative situations, it could provide double the profit.

3.6 Pick-up point (PP)

A PP is one of the out-of-home delivery alternatives that is rapidly becoming widespread in Europe. PPs are places where products offered for sale in the online marketplace are left for individual customers to pick up. These points consist of local businesses (florists, dry cleaners, etc.) operating often six days a week. They provide flexibility by offering consumers the option to pick-up at a time that suits them [45]. In the transportation literature, PPs are defined as a more convenient, more sustainable, more flexible, and safer service option for stakeholders [46]. In the last-mile literature, PPs serve the same purpose as the collection point. According to Ranieri et al. [47], PPs were created using the concept of CDPs. In the literature, the same concept is also

used for service. Studies addressing PPs with a collaborative approach were examined, and three studies were found in this context.

Zhu et al. [48] proposed PPs that facilitate road traffic pattern management. A case study based on real trip source data was conducted to validate the proposed approach. The study consisted of three steps. In the first step, the driver's waiting time was examined and the walking distance for passengers was defined. In the second step, the spatial distribution characteristics of the point where taxi demand was high were analyzed and candidate PPs were identified. In the last step, the most suitable PP for traffic management was selected by fuzzy Analytic Hierarchy Process (AHP). Justiani et al. [49] evaluated the benefits of collaborative PPs in urban distribution. The study proposed a multi-vehicle routing problem. A case study was conducted in Pekanbaru, Indonesia. The results showed that sustainable development was possible in the city and concluded that economic benefits were obtained from collaboration. Zhang et al. [50] designed a PP recommendation strategy based on a user incentive mechanism. In the first step, a four-dimensional crowd-sourcing model was established. In the second step, a suitable pick-up mechanism was designed to encourage the user to walk based on the cost. In the third step, a forward ratio concept was proposed to reduce the time. The task cost and the maximum walking distance limit were used to calculate the PP.

3.7 Pick-up drop-off point (PUDO)

PUDOs are areas located on roads or in parking areas that provide pick-up and drop-off services. PUDOs can be found temporarily in roadways, curbs, and public parking lots [51]. In the last-mile literature, PUDO often serves the same purpose as the CDP. Studies addressing the use of PUDO in the last-mile logistics literature between 2012 and 2024, and addressing it in combination with a collaborative strategy, are examined below.

Maricˇic et al. [52] investigated the operating cost and service level of PUDO locations when comparing the pricing of ridesharing with door-to-door ridesharing and private ridesharing. The study, conducted in Amsterdam, Netherlands, established a matching model for ridesharing with PUDO. When the discount rate for ridesharing with PUDO was higher compared to door-to-door ridesharing, total vehicle hours could be reduced by 2.2%, and total passenger benefits could be improved by 2%. Zhu et al. [53] evaluated the sustainability and mobility impacts of a demand-side cooperative shared automated mobility service. The trip matching problem was solved using Urban Mobility Simulation. The objective was to maximize the profit of shared automated mobility services. The case study was implemented in a district of the New York City network. The proposed model significantly reduced the operating costs in terms of vehicle energy consumption, vehicle hours, and vehicle miles, and the demand-side cooperative strategy provided a 4%-10% advantage in terms of sustainability and mobility. In another study in 2021, Zhu et al. [54] designed a system where customers are asked to walk to PUDOs. The formulation and heuristics to solve a large sample were modeled. It was tested with Manhattan taxi trip data consisting of 9970 requests in an hour. The study found that users going to or arriving at the most demanded areas were more likely to need to walk. Again in 2021, Gunawan et al. [55] used walking distance and minimum demand data to generate a PUDO layout using a genetic algorithm and included the spatiotemporal distribution of mobility on demand. In the study, a genetic algorithm is used to determine the location placement by taking into account the customer's demand and walking distance. Li et al. [56] focused on the preference diversity of passengers according to PUDO ride-sharing plans. A case study was conducted as a survey on the PUDO preferences of passengers in Shanghai. Factor analysis was conducted on the preference diversity of passengers. The distribution type of passengers' preferences was determined using K-means and Linear Discriminant Analysis. The relationship between passengers' gender and PUDO preference was revealed by Levene's Test and T-Test. In addition, a mixed multinomial logistic model was established to formulate the passengers' decision function. D'Orso et al. [57] investigated the comparison of micro and macro indicators to assess walkability for micro transportation in suburban neighborhoods. The optimum locations for placing PUDO stops for micro transportation service were determined. A case study was conducted in three neighborhoods in the city of Palermo, Italy. The study was conducted with the created GIS database. As a result, a walkability index was developed that shows the attractiveness of certain locations in terms of walkability. Silva et al. [50] proposed a method to generate PUDO for shared autonomous vehicles. The method was applied to provide the main findings and demonstrate its feasibility. Three results were obtained when the study was applied. First, if the willingness of users to walk increased, the number of PUDOs decreased. Second, 83% of curbside parking spaces could be reused within a three-minute walk, while 100% of curbside parking spaces could be reused within a ten-minute walk. Third, 55% of curbside parking spaces could be utilized within a ten-minute walk, and private parking spaces could be accessed without the need for PUDO. In another study conducted in the same year, authors proposed taxi ride sharing with shared PUDOs. Rideshare customers could walk a short distance to the PUDO. Similar studies discussed the advantages of lower fuel consumption, lower emissions, and shorter travel times. This study was designed to maximize the sharing ratio and rejection efficiency. A case study with real data was conducted in New York City and Porto [58].

3.8 Parcel locker

Parcel lockers are delivery machines located in frequently visited locations that do not require surveillance. A parcel locker is available 24 hours a day, every day of the week and it provides both package reception and delivery [59]. Parcel lockers are also known as shared reception boxes. They have locks with variable opening codes [60]. Parcel lockers, along with PUDO, are the most common collaborative use case in the last-mile logistics literature.

Mohamed et al. [61] wanted to use crowd-sourcing to complete the last-mile delivery. Using a citizen pool, products were delivered to the doorstep of consumers from lockers distributed all over the city. Deliveries were made within the specified time interval for each customer, considering the availability and capacity of the drivers. Two integer linear programming models were proposed to minimize the wages paid to the employees through optimal routing for each driver and optimal assignment of packages to the drivers. The proposed models were solved with Lingo software, and the running times were compared. The Variable Neighborhood Search Algorithm was also developed in the local search phase, and the C++ programming language was used to solve large-sized problems faster. A correlation was found between some parameters and the total delivery cost, but others did not give definite results. Mousavi et al. [62] studied three different crowd shipping problems. The authors studied the behavioral patterns of crowd shippers and customers to measure their dependence on delivery charges and the locations of parcel lockers. The problem was modeled as a mixed integer linear programming model. The results obtained showed that higher profits can be achieved. The second problem proposed a two-stage stochastic model for tactical decisions regarding the assignment of customer packages to mobile depots and mobile lockers to stopover points. Advanced decomposition algorithms were formulated to solve real-life problems. The third problem proposed a dynamic model where customers in the store were crowd shippers and orders were delivered within a few hours. The proposed model was built as a Markov decision stage for operational decisions. Juvik et al. [63] investigated a solution method for the problems encountered with the increasing number of automatic parcel lockers (APLs) in Bergen, Norway. The study focused on the participation of postal companies in collaborative applications related to APLs by sharing the APLs, the terminal, and both. Different scenarios were created to minimize the cost of delivering parcels with APLs. A mixed integer linear programming model was proposed. Zhuang et al. [64] proposed a study to integrate decentralized parcel lockers into crowd shipping operations. A mixed integer programming model was developed to optimize driver-parcel matching and routing using decentralized parcel locker transfers. By strategically utilizing underutilized decentralized lockers, a case study with 300 parcels and 900 crowd drivers demonstrated the potential of crowd shipping for economical last-mile urban distribution. As a result, 12.1% cost minimization was achieved. Zhang et al. [65] conducted a study on crowd shipping operations that recruit regular drivers and crowd shippers in an online environment. A city crowd logistics network was designed as a parcel locker location assignment problem to meet the logistics demand. The authors tried to determine the location of parcel lockers to minimize the total cost to help logistics companies develop an effective business strategy for a hybrid crowd shipping operation system. Pang et al. [66] proposed a parcel locker sharing model in which LSPs with parcel locker facilities and LSPs without parcel lockers share parcel locker capacity to avoid financial problems caused by demand fluctuations. The model allowed LSPs with parcel locker facilities to rent the lockers they do not use to others for a rental fee. LSPs without parcel lockers rented parcel lockers to minimize costs. The authors also proposed a price range and an optimum rental price for renting. Ozyavas et al. [67] proposed a system where parcel lockers are used as both a transfer point for delivery companies and a collection point for customers. They presented a variation of the location-routing problem. A case study was conducted in Groningen, the Netherlands. The study found that the common role of parcel lockers is important. The results showed that this common use reduced the probability of customers driving to the parcel locker, significantly reduced the travel distance of delivery vehicles, and was suitable for coping with the potential future increase in parcel collection demand. Wyrowski et al. [68] proposed a crowd shipping application where public transport users pick up parcels from parcel lockers, take them during their subway journey, and drop them off at the other parcel lockers. The optimization model involving parcel lockers aimed to meet the crowd shipping supply and demand. The platform provider, receivers, crowd shippers, and carriers are the main stakeholders with different goals. The study evaluated the relationship between these stakeholders' goals. The efficiency loss of a more restricted matching policy, where only a single crowd shipper could be assigned to the full path of each parcel between origin and destination, was measured. The impact of delays was also investigated. In the same year, Zhang et al. [69] proposed a study where public transport passengers were intended to serve as crowd carriers. In the study, outlier packages were identified as suitable for crowd transportation. These outlier packages were matched with crowd carriers who picked up packages from selected parcel lockers. The study also investigated whether crowd transportation was feasible with real-world data. The performance of a crowd carrier and a scenario without one were compared in the study. As a result, it was found that the carrier's carbon emissions and distance traveled could be reduced by 20%.

4 Results

The results of the study contribute to the concept of crowd-sourcing and logistics science. It is consistent with the studies conducted on the sharing economy in recent years. This study on organizational collaboration and the sharing economy seeks answers to some questions asked in the context of sustainability in the logistics sector regarding last-mile logistics activities.

At the end of the data collection, 85 studies were determined with the general results methodology steps 1 to 5 given in Section 2. The number of these studies was reduced to 39 after performing steps 6 to 8. Later, after general readings, 4 more studies were added that were considered relevant and contributed to the study, reaching 43 studies. These 43 studies cover the years between 2012 and 2024, and were composed of 31 different journals, conference papers, book chapters, and master theses. And the studies included the work of 136 authors.

4.1 *Yearly number of publications*

Time analysis since the pioneering article by Roca-Riu et al. [14], a steady increase has been observed in the research on collaborative strategies in organizations used in last-mile logistics until 2023, reaching its peak in 2024 (9 studies) (Figure 2). The study by Roca-Riu and Estrada, presented at The Seventh International Conference on City Logistics, also focuses on the relevant and promising technical aspects of last-mile logistics: collaboration of LSPs with equal market shares, and urban collaborative physical space (UCC). These concepts have led to the idea of the type of collaboration used in urban physical spaces in last-mile logistics and the idea of collaborative strategies that provide sustainable benefits. The peak of the studies in 2024 is an indication of the increasing academic interest in collaborative strategies in recent years. This situation can be related to the increase in costs and environmental concerns in LSPs due to the increase in online commerce. LSPs can access physical distribution assets, skills, and services that they do not own. For this reason, interest in collaboration strategies in last-mile logistics has been increasing since 2021 (Figure 2). Figure illustrates the growing academic interest in urban sustainability and the growing popularity of collaborative solutions to address the operational challenges posed by the last-mile delivery.

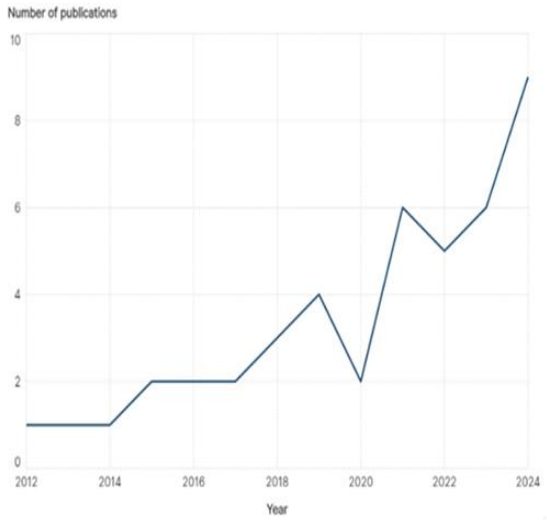


Figure 2. Number of publications per year

4.2 *Subject areas and structure of the literature*

In order to understand the interest in a popular topic in the rapidly growing package delivery industry, a number of scientific studies on that topic have been examined. Several scientific disciplines support studies on collaborative strategies in organizations in last-mile logistics. The subject diversity of 43 studies in this field was determined using Scimago (www.scimagojr.com). In the analyses conducted, it was seen that the most effective fields in which collaborative strategies were studied in environmental sciences, transportation, social sciences, engineering, computer science, business, and mathematics. The most dominant categories were social sciences, transportation, and industrial engineering. This studies can be categorized as multidisciplinary and interdisciplinary.

4.3 *The most productive journals*

As environmental concerns are incorporated into current practices in last-mile logistics, collaborative approaches to create more sustainable solutions are becoming increasingly important. The analysis reveals that no single journal holds a dominant position in this field; however, several journals contribute substantially by publishing a noteworthy number of studies on the topic (Figure 3). The shared use of organizations in last-mile logistics has contributed to the development of a new collaborative paradigm. This collaborative use assumes the shared use of facilities and the sharing of access to operational capabilities in these areas.

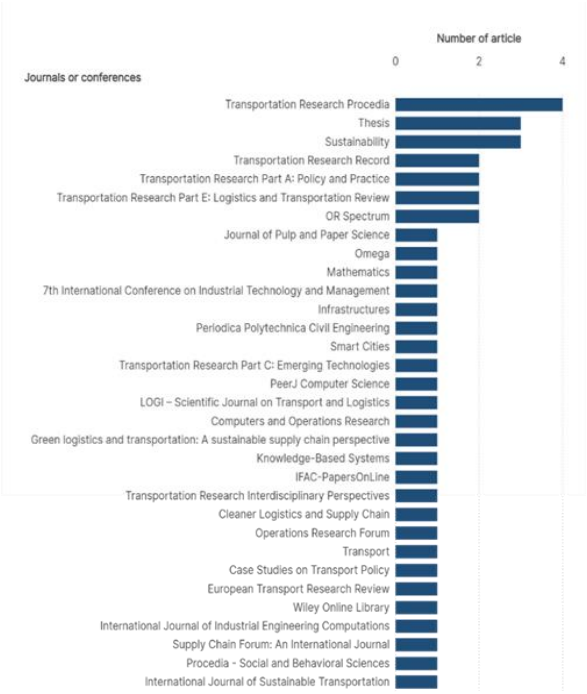


Figure 3. Number of studies by journal

4.4 *Most prominent authors*

There are 136 authors in total who contributed to 43 studies. As can be seen in Figure 4, there is a tendency towards co-authorship. Furthermore, a study is considered an international partnership if collaboration is present.

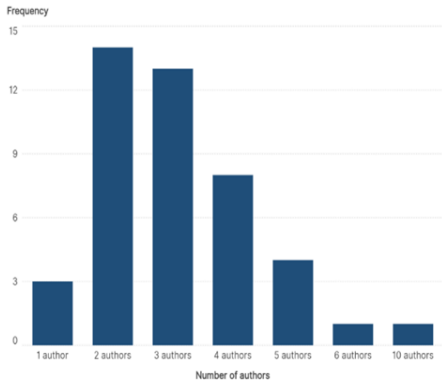


Figure 4. Distribution of studies by author numbers

4.5 Linguistic analysis to identify trends in collaborative strategies in last-mile logistics

In the study, the Free Word Cloud Generator program was used to analyze the words in the titles, abstracts, and keywords of 43 examined articles. The frequency of word associations is used to create word clouds that show the main themes in this field and the relationships between these themes [8]. The program analyzed 9897 words generated from the studies. The results of the analysis are shown as a word cloud in Figure 5. This analysis showed that collaborative practices in last-mile logistics are related to urban areas, delivery of consolidated parcels in collaboration through the shared economy to reduce environmental and economic costs, and also different practices and organizations. Instead of automated clustering, thematic codes were developed through full-text analysis, focusing on infrastructure type, stakeholder roles, and service models.

Figure 5. Word cloud and frequency of representative words

5 Discussion

The transformation of business models in last-mile logistics with the increasing use of e-commerce attracts the attention of both LSPs and researchers. Collaborative strategies are an important new business model supporting sustainability in last-mile logistics activities. In this study, collaborative strategies are defined as the shared use of urban delivery infrastructure. In other words, they aim to support sustainability by using excess delivery center capacity for deliveries without adding a new physical space to the network. A successful collaborative application makes life easier for urban residents by reducing the number of delivery points. LSPs could reduce delivery costs and maintain the same level of service. However, these positive results may not always be realized in practice. For example, with the increasing number of shipments required by households during the COVID-19 pandemic, the capacity of delivery points may not be suitable for shared use, and there may not always be crowd shippers who can support delivery in a planned manner [69]. As all actors involved in a collaborative approach want to reduce costs, the correct allocation of costs and benefits is crucial to its success. Stakeholders need to develop a more effective understanding of urban areas in economic, environmental, social, and technical areas. Therefore, it is necessary to identify the unexpected difficulties and consequences as well as the opportunities in this collaborative use. Based on the information obtained from the 43 studies examined, some negative aspects have been revealed, as well as many positive aspects. While the collaborative use of organizations provides several advantages in terms of last-mile logistics operations, some disadvantages can also arise if the process is not managed correctly and effectively. The collaborative practices will increase the demand for fast and cheap deliveries by end users, thus preventing LSPs from trying to compete by being exposed to high delivery costs. However, very large retail companies have not yet conducted such a study and obtained data. In addition, crowd shippers who contribute to this sector may have concerns about income. Companies that implement collaborative strategies do not have systems such as overtime pay or minimum wage. In addition to these concerns, parking fees, fuel costs, bridge or highway tolls, and delays caused by these are added to the concerns. Beyond identifying publication trends and methodological features, this review synthesizes key collaboration strategies and highlights the most shared infrastructures in last-mile logistics activities and the positive and negative aspects of these collaboration strategies. These insights can inform the design of future research frameworks and help practitioners align logistics innovations with sustainability goals.

Among the 43 studies reviewed, UCCs, parcel lockers, and PUDO points emerged as the most frequently discussed collaborative models. This finding is also reflected in our synthesis, as these three physical infrastructures are considered essential for last-mile collaboration due to their operational flexibility and ease of user access.

While many of the analyzed studies focus on digital coordination or technological platforms, relatively few explore physical infrastructure as a core component of collaboration. Our review addresses this gap by introducing a structured classification of eight distinct physical collaboration spaces, which has not been comprehensively presented in prior reviews.

In addition, most studies tend to emphasize the environmental benefits of collaboration, whereas socio-economic dimensions and policy implications remain underexplored. This contrast underscores the need for more holistic approaches, and our conclusions aim to support further research in that direction.

6 Conclusion

The purpose of this study is to present a review of studies on collaborative shared use of organizations in last-mile logistics. It covers 43 studies from 2012 to 2024, reviewed from six databases. The scientific analysis addressed the following research questions from an urban sustainability perspective:

RQ1. How is the literature on the collaborative use of organizations in last-mile logistics structured?

A1. The study is seen to be an interdisciplinary subject with contributions from environmental sciences, transportation, social and behavioral sciences, engineering, computer sciences, decision sciences, business, management, accounting, mathematics, and economics. The

most dominant category is social sciences, followed by engineering sciences. Studies in this field include research, modeling, and case studies. As of 2021, the increase in collaborative joint use of organizations in last-mile logistics can be explained by the demand for e-commerce and the increasing customer expectations on cost and delivery speed.

RQ2. What are the main trends in collaborative strategies in last-mile logistics from an urban sustainability perspective?

A2. The frequently used words in the literature are delivery, urban, consolidation, shared, and parcel. Collaborative practices in last-mile logistics are related to urban areas, delivery of consolidated parcels in collaboration through the shared economy to reduce environmental and economic costs, and also different practices and organizations.

RQ3. What might be future research options?

A3. According to the 43 studies reviewed, the results show that studies on the collaborative use of places such as PUDOs and parcel lockers have increased in recent years. Further research will provide a better understanding of AI business models and their integration into the system. Future studies may not only share distribution areas but also customer data. Moreover, due to limited land, citizens can use their own homes or apartments as micro-distribution areas. In this way, eco-friendly distribution systems can be created. The widespread use of collaborative strategies in last-mile logistics operations that support the sustainability of urban areas depends on the success of the practices, which in this case can only be possible through optimized decisions. In this respect, there is a need for more studies that approach the problem from an operations research perspective and include real-life applications.

Consequently, although last-mile logistics operations contribute greatly to the employment and economy of urban areas, they also bring many negative impacts such as traffic congestion, parking problems, air and noise pollution. On the other hand, the last-mile logistics activities, which take place at the final stage of the supply chain, have special importance in terms of customer satisfaction as they take place at the stage where direct contact with the customer is ensured. Moreover, customers are only one of the last-mile logistics stakeholders, and compromise solutions to the conflicting objectives of many stakeholders are essential. While customers desire fast, cost-effective, and damage-free delivery of their orders, LSPs want to gain a competitive advantage by focusing on optimizing their networks to fulfill their responsibilities at the lowest cost. Local authorities need to develop policies, make infrastructure investments, and implement incentive mechanisms to ensure that last-mile logistics activities are organized in a way that does not increase the urban carbon footprint and does not affect the well-being of urban residents. The use of collaborative applications in last-mile logistics emerges as an important tool in achieving all these conflicting goals. In this study, collaborative strategies implemented in the last-mile logistics literature from the perspective of sustainability of urban areas were investigated, and the advantages provided by collaborative applications and the challenges encountered in implementation were evaluated. It is hoped that the obtained results will guide researchers in their future studies and help policymakers and practitioners in their decisions. Rather than presenting a simple list of studies, this review offers strategic insights into how and in which facilities collaboration in last-mile logistics networks is most likely to thrive. The identified gaps and future directions aim to guide researchers in developing models that are not only operationally efficient but also aligned with long-term urban sustainability objectives. These conclusions are based on recent studies that emphasize the role of smart platforms and digital ecosystems in facilitating shared logistics operations. As the use of AI and real-time data exchange increases, future models may involve not only shared infrastructure but also collaborative use of customer data under strict privacy frameworks.

To the best of our knowledge, this is the first comprehensive literature review that specifically investigates collaborative strategies in last-mile logistics through the lens of physical urban delivery infrastructure. Unlike previous studies that approach collaboration from broader or conceptual angles, this study categorizes and analyzes eight distinct types of shared physical spaces—such as parcel lockers, micro-depots, PUDO points, and urban consolidation centers—used in collaborative logistics. By doing so, it not only identifies policy-relevant trends and future research opportunities but also offers a unique typology that can serve as a foundation for academic and practical advancements in sustainable last-mile delivery.

One limitation of this study is the reliance on publicly accessible databases, which may omit gray literature or unpublished industrial reports. In future work, expanding the dataset to include practitioner insights may enrich the analysis.

Looking ahead, future research can explore how crowdsourcing models—particularly those involving citizen couriers operating through shared physical locations—can improve the efficiency, flexibility, and responsiveness of last-mile logistics systems. Notably, in four of the studies included in this review, such models were already implemented, indicating an emerging but under-researched trend.

As real-time data technologies advance, collaborative systems that integrate human and digital resources (e.g., AI-based matching platforms, dynamic routing) may become more viable. Moreover, secure and ethical data sharing between stakeholders, when aligned with privacy regulations, could play a critical role in optimizing delivery networks and enhancing service quality. Socio-economic evaluations of these models in diverse urban contexts remain an open and valuable avenue for future research.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 20%

References

[1] V. Silva, A. Amaral, and T. Fontes, “Sustainable Urban Last-Mile Logistics: A Systematic Literature Review,”

Sustainability, 15 (3), 2285, 2023, https://doi.org/10.3390/su15032285.
[2] S. M. Patella, G. Grazieschi, V. Gatta, E. Marcucci, and S. Carrese, "The Adoption of Green Vehicles in Last Mile Logistics: A Systematic Review," Sustainability, 13 (1), 6, 2020, https://doi.org/10.3390/su13010006.
[3] J. Olsson, D. Hellström, and H. Pålsson, "Framework of Last Mile Logistics Research: A Systematic Review of the Literature," Sustainability, 11 (24), 7131, 2019, https://doi.org/10.3390/su11247131.
[4] L. Ranieri, S. Digiesi, B. Silvestri, and M. Roccotelli, "A Review of Last Mile Logistics Innovations in an Externalities Cost Reduction Vision," Sustainability, 10 (3), 782, 2018, https://doi.org/10.3390/su10030782.
[5] E. Aktas, M. Bourlakis, and D. Zissis, "Collaboration in the last mile: evidence from grocery deliveries," International Journal of Logistics Research and Applications, 24 (3), 227–241, 2021, https://doi.org/10.1080/13675567.2020.1740660.
[6] S. Sina Mohri, H. Ghaderi, N. Nassir, and R. G. Thompson, "Crowdshipping for sustainable urban logistics: A systematic review of the literature," Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 178, 103289, 2023, https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103289.
[7] E. B. Kızılırmak, S. Öztaş, N. Çağlayan, and M. Tutam, "Design and Performance Measures of AVS/R Systems: A Bibliometric Literature Review," Arch Computat Methods Eng, 31 (6), 3455–3472, 2024, https://doi.org/10.1007/s11831-024-10084-9.
[8] L. Saglietto, "Bibliometric analysis of sharing economy logistics and crowd logistics," IJCS, 5 (1), 31–54, 2021, https://doi.org/10.1108/IJCS-07-2020-0014.
[9] E. Demir, A. Syntetos, and T. Van Woensel, "Last mile logistics: Research trends and needs," IMA Journal of Management Mathematics, 33 (4), 549–561, 2022, https://doi.org/10.1093/imaman/dpac006.
[10] E. G. Nathanail, N. Gavanas, and G. Adamos, Eds., Smart Energy for Smart Transport: Proceedings of the 6th Conference on Sustainable Urban Mobility, CSUM2022, August 31-September 2, 2022, Skiathos Island, Greece, 1st ed. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, https://doi.org/10.1007/978-3-031-23721-8.
[11] M. A. Gogas and E. Nathanail, "Evaluation of Urban Consolidation Centers: A Methodological Framework," Procedia Engineering, 178, 461–471, 2017, https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.089.
[12] J. Allen, M. Browne, A. Woodburn, and J. Leonardi, "The Role of Urban Consolidation Centres in Sustainable Freight Transport," Transport Reviews, 32 (4), 473–490, 2012, https://doi.org/10.1080/01441647.2012.688074.
[13] J. Allen, M. Browne, A. Woodburn, and J. Leonardi, "A Review of Urban Consolidation Centres in the Supply Chain Based on a Case Study Approach," Supply Chain Forum: An International Journal, 15 (4), 100–112, 2014, https://doi.org/10.1080/16258312.2014.11517361.
[14] M. Roca-Riu and M. Estrada, "An Evaluation of Urban Consolidation Centers Through Logistics Systems Analysis in Circumstances Where Companies have Equal Market Shares," Procedia - Social and Behavioral Sciences, 39, 796–806, 2012, https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.148.
[15] G. Battaia, L. Faure, G. Marqués, R. Guillaume, and J. R. Montoya-Torres, "A Methodology to Anticipate the Activity Level of Collaborative Networks: The Case of Urban Consolidation," Supply Chain Forum: An International Journal, 15 (4), 70–82, 2014, https://doi.org/10.1080/16258312.2014.11517359.
[16] M. Roca-Riu, M. Estrada, and E. Fernández, "An Evaluation of Urban Consolidation Centers Through Continuous Analysis with Non-equal Market Share Companies," Transportation Research Procedia, 12, 370–382, 2016, https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.073.
[17] S. D. Handoko and H. C. Lau, "Enabling Carrier Collaboration via Order Sharing Double Auction: A Singapore Urban Logistics Perspective," Transportation Research Procedia, 12, 777–786, 2016, https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.031.
[18] D. Paddeu, "The Bristol-Bath Urban freight Consolidation Centre from the perspective of its users," Case Studies on Transport Policy, 5 (3), 483–491, 2017, https://doi.org/10.1016/j.cstp.2017.06.001.
[19] J. Gonzalez-Feliu, C. Pronello, and J. M. S. Grau, "Multi-Stakeholder Collaboration in Urban Transport: State-of-the-Art and Research Opportunities," Transport, 33 (4), 1079–1094, 2018, https://doi.org/10.3846/transport.2018.6810.
[20] B. Hezarkhani, M. Slikker, and T. Van Woensel, "Gain-sharing in urban consolidation centers," European Journal of Operational Research, 279 (2), 380–392, 2019, https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.05.028.
[21] S. Nataraj, D. Ferone, C. Quintero-Araujo, A. A. Juan, and P. Festa, "Consolidation centers in city logistics: A cooperative approach based on the location routing problem," Int. J. Ind. Eng. Comput., 393–404, 2019, https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2019.1.001.
[22] V. Gatta, E. Marcucci, P. Delle Site, M. Le Pira, and C. S. Carrocci, "Planning with stakeholders: Analysing alternative off-hour delivery solutions via an interactive multi-criteria approach," Research in Transportation Economics, 73, 53–62, 2019, https://doi.org/10.1016/j.retrec.2018.12.004.
[23] M. Kaspi, T. Raviv, and M. W. Ulmer, "Directions for future research on urban mobility and city logistics," Networks, 79 (3), 253–263, 2022, https://doi.org/10.1002/net.22092.
[24] L. N. Rosenberg et al., "Introducing the Shared Micro-Depot Network for Last-Mile Logistics," Sustainability, 13 (4), 2067, 2021, https://doi.org/10.3390/su13042067.
[25] K. Stodick and C. Deckert, "Sustainable Parcel Delivery in Urban Areas with Micro Depots," in Logistikmanagement für eine nachhaltige Wirtschaft,

Springer Gabler, 2021, 417–428, https://doi.org/10.20378/irb-58596.
[26] N. Urquhart, S. Höhl, and E. Hart, "An illumination algorithm approach to solving the micro-depot routing problem," Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference, Prague, Czech Republic: ACM, 2019, 1347–1355. https://doi.org/10.1145/3321707.3321767.
[27] L. Hörsting and C. Cleophas, "Integrating micro-depot freight transport in existing public transport services," Operations Research Forum, 4 (3), 54, 2023, https://doi.org/10.1007/s43069-023-00232-5.
[28] M. A. Maldonado Bonilla, M. Bouzon, and C. C. Peña-Montoya, "Taxonomy of key practices for a sustainable last-mile logistics network in e-retail: A comprehensive literature review," Cleaner Logistics and Supply Chain, 11, 100149, 2024, https://doi.org/10.1016/j.clscn.2024.100149.
[29] M. Novotná, L. Švadlenka, S. Jovčić, and V. Simić, "Micro-hub location selection for sustainable last-mile delivery," PLoS ONE, 17 (7), e0270926, 2022, https://doi.org/10.1371/journal.pone.0270926.
[30] C. Ackva and M. W. Ulmer, "Consistent routing for local same-day delivery via micro-hubs," OR Spectrum, 46 (2), 375–409, 2024, https://doi.org/10.1007/s00291-023-00735-x.
[31] M. Hribernik, K. Zero, S. Kummer, and D. M. Herold, "City logistics: Towards a blockchain decision framework for collaborative parcel deliveries in micro-hubs," Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 8, 100274, 2020, https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100274.
[32] S. Ballare and J. Lin, "Investigating the use of microhubs and crowd shipping for last mile delivery," Transportation Research Procedia, 46, 277–284, 2020, https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.191.
[33] C. Ackva and M. W. Ulmer, "Consistent routing for local same-day delivery via micro-hubs," OR Spectrum, 46 (2), 375–409, 2024, https://doi.org/10.1007/s00291-023-00735-x.
[34] P. Carotenuto, M. Gastaldi, S. Giordani, R. Rossi, A. Rabachin, and A. Salvatore, "Comparison of various urban distribution systems supporting e-commerce: Point-to-point vs collection-point-based deliveries," Transportation Research Procedia, 30, 188–196, 2018, https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.09.021.
[35] I. Cardenas, Y. Borbon-Galvez, T. Verlinden, E. Van De Voorde, T. Vanelslander, and W. Dewulf, "City logistics, urban goods distribution and last mile delivery and collection," Competition and Regulation in Network Industries, 18 (1–2), 22–43, 2017, https://doi.org/10.1177/1783591717736505.
[36] S. Pan, C. Chen, and R. Y. Zhong, "A crowdsourcing solution to collect e-commerce reverse flows in metropolitan areas," IFAC-PapersOnLine, 48 (3), 1984–1989, 2015, https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.379.
[37] A. De Meyer, R. Guisson, G. Verbelen, and F. Van Hulle, "The impact of different cooperation strategies on the efficiency of rural parcel deliveries," Transportation Research Procedia, 72, 2331–2338, 2023, https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.724.
[38] A. Kedia, D. Kusumastuti, and A. Nicholson, "Locating collection and delivery points for goods' last-mile travel: A case study in New Zealand," Transportation Research Procedia, 46, 85–92, 2020, https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.167.
[39] L. Song, T. Cherrett, F. McLeod, and W. Guan, "Addressing the last mile problem: Transport impacts of collection and delivery points," Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2097 (1), 9–18, 2009, https://doi.org/10.3141/2097-02.
[40] A. T. Collins, "Behavioral influences on the environmental impact of collection/delivery points," in Green Logistics and Transportation, B. Fahimnia, M. G. H. Bell, D. A. Hensher, and J. Sarkis, Eds., Greening of Industry Networks Studies, vol. 4. Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 15–34, https://doi.org/10.1007/978-3-319-17181-4_2.
[41] Y. Wang, J. Zhang, K. Assogba, Y. Liu, M. Xu, and Y. Wang, "Collaboration and transportation resource sharing in multiple centers vehicle routing optimization with delivery and pickup," Knowledge-Based Systems, 160, 296–310, 2018, https://doi.org/10.1016/j.knosys.2018.07.024.
[42] H. Akeb, B. Moncef, and B. Durand, "Building a collaborative solution in dense urban city settings to enhance parcel delivery: An effective crowd model in Paris," Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 119, 223–233, 2018, https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.04.007.
[43] S. Mancini and M. Gansterer, "Vehicle routing with private and shared delivery locations," Computers & Operations Research, 133, 105361, 2021, https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105361.
[44] L. Li, M. Huang, X. Yue, and X. Wang, "The strategic analysis of collection delivery points network sharing in last-mile logistics market," Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 183, 103423, 2024, https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103423.
[45] E. Morganti, L. Dablanc, and F. Fortin, "Final deliveries for online shopping: The deployment of pickup point networks in urban and suburban areas," Research in Transportation Business & Management, 11, 23–31, 2014, https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2014.03.002.
[46] L. Guarino Neto and J. G. V. Vieira, "An investigation of consumer intention to use pick-up point services for last-mile distribution in a developing country," Journal of Retailing and Consumer Services, 74, 103425, 2023, https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2023.103425.
[47] L. Ranieri, S. Digiesi, B. Silvestri, and M. Roccotelli, "A review of last mile logistics innovations in an externalities cost reduction vision," Sustainability, 10 (3), 782, 2018, https://doi.org/10.3390/su10030782.

[48] W. Zhu, J. Lu, Y. Li, and Y. Yang, "A pick-up points recommendation system for ridesourcing service," Sustainability, 11 (4), 1097, 2019, https://doi.org/10.3390/su11041097.
[49] S. Justiani and B. S. Wibowo, "The economic and environmental benefits of collaborative pick-up in urban delivery systems," LOGI – Scientific Journal on Transport and Logistics, 13 (1), 245–256, 2022, https://doi.org/10.2478/logi-2022-0022.
[50] J. Zhang, B. Li, X. Ye, and Y. Chen, "Pick-up point recommendation strategy based on user incentive mechanism," PeerJ Computer Science, 9, e1692, 2023, https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1692.
[51] D. Silva and C. Csiszár, "Locating method for pick-up and drop-off spots for shared autonomous vehicle-based mobility services," Periodica Polytechnica Civil Engineering, 68 (1), 197–206, 2024, https://doi.org/10.3311/PPci.22541.
[52] M. Maričić, R. Kucharski, and O. Cats, "The effects of pricing and service configurations on a ride-pooling service with pick-up and drop-off points," unpublished, 2021.
[53] L. Zhu, Z. Zhao, and G. Wu, "Shared automated mobility with demand-side cooperation: A proof-of-concept micro simulation study," Sustainability, 13 (5), p. 2483, 2021, https://doi.org/10.3390/su13052483.
[54] A. Fielbaum, X. Bai, and J. Alonso-Mora, "On-demand ridesharing with optimized pick-up and drop-off walking locations," Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 126, 103061, 2021, https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103061.
[55] R. K. Gunawan and Susilawati, "A study of spatiotemporal distribution of mobility-on-demand in generating pick-up/drop-off location placement," Smart Cities, 4 (2), 746–766, 2021, https://doi.org/10.3390/smartcities4020038.
[56] G. Li, H. Zhao, and L. Li, "The study of passengers' preference heterogeneity on ride-sharing considering pick-up/drop-off points," SSRN Journal, 2022, https://doi.org/10.2139/ssrn.4115435.
[57] G. D'Orso, L. Minaudo, and M. Migliore, "Comparing macro scale and micro scale walkability indicators to establish pick-up/drop-off locations for a micro transit service in a suburban area," Infrastructures, 8 (12), 165, 2023, https://doi.org/10.3390/infrastructures8120165.
[58] M. Stumpe, P. Dieter, G. Schryen, O. Müller, and D. Beverungen, "Designing taxi ridesharing systems with shared pick-up and drop-off locations: Insights from a computational study," Transportation Research Part A: Policy and Practice, 183, 104063, 2024, https://doi.org/10.1016/j.tra.2024.104063.
[59] S. Iwan, K. Kijewska, and J. Lemke, "Analysis of parcel lockers' efficiency as the last mile delivery solution – The results of the research in Poland," Transportation Research Procedia, 12, 644–655, 2016, https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.018.
[60] Y. Deutsch and B. Golany, "A parcel locker network as a solution to the logistics last mile problem," International Journal of Production Research, 56 (1–2), 251–261, 2018, https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1395490.
[61] E. Mohamed and M. Ndiaye, "Optimal routing and scheduling in e-commerce logistics using crowdsourcing strategies," in 2018 7th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM), Oxford, United Kingdom: IEEE, 2018, 248–253, https://doi.org/10.1109/ICITM.2018.8333955.
[62] K. Mousavi and S. Mousavichashmi, "Strategic, tactical, and operational decision-making in crowd-shipping," unpublished, 2022.
[63] J. L. Falch and J. F. Øverås, "A study on potential collaboration in the parcel delivery industry in Bergen using mixed-integer linear programming," unpublished, 2022.
[64] X.-Y. Zhuang, I.-L. Wang, and C.-Y. Lee, "An integrated optimization approach for crowd shipping leveraging smart lockers as decentralized urban transshipment hubs," SSRN Journal, 2023, https://doi.org/10.2139/ssrn.4669250.
[65] S. Zhang, T. V. Le, and M. Roorda, "Optimizing parcel locker locations in a city crowd logistics network," Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2677 (12), 267–283, 2023, https://doi.org/10.1177/03611981231167425.
[66] K.-W. Pang, J. Xu, R. Jiang, and R. Liu, "Parcel-locker-sharing model for e-commerce logistics service providers," Mathematics, 12 (18), 2802, 2024, https://doi.org/10.3390/math12182802.
[67] P. Ozyavas, P. Buijs, E. Ursavas, and R. Teunter, "Designing a sustainable delivery network with parcel locker systems as collection and transfer points," Omega, 131, 103199, 2024, https://doi.org/10.1016/j.omega.2024.103199.
[68] A. Wyrowski, N. Boysen, D. Briskorn, and S. Schwerdfeger, "Public transport crowd shipping: Moving shipments among parcel lockers located at public transport stations," OR Spectrum, 46 (3), 873–907, 2024, https://doi.org/10.1007/s00291-024-00748-0.
[69] M. Zhang and L. Cheah, "Prioritizing outlier parcels for public transport-based crowd shipping in urban logistics," Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2678 (3), 601–612, 2024, https://doi.org/10.1177/03611981231182429.

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Düzeltme Yazısı / Erratum

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Düzeltme Yazısı "Niğde ili'ndeki potansiyel evapotranspirasyon tahminlerinin trend analizi" [NÖHÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6(2), 602-608, 2017]

Erratum to "Trend analysis of potential evapotranspiration predictions in Nigde province" [NOHU Journal of Engineering Sciences 6(2), 602-608, 2017]

Onur Arslan [1,*]

[1] *Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 14100, Bolu, Türkiye*

Düzeltme

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, "https://doi.org/10.28948/ngumuh.341813" DOI numaralı araştırma makalesinde yazar tarafından ORCID numarasının sehven hatalı olarak yazıldığı anlaşılmıştır. Yapılan bu hatadan dolayı yazar, okuyuculardan özür dilemektedir.

Orijinal makalede "0000-0003-2456-1788" olarak hatalı verilen ORCID numarasının düzeltilmesi amacıyla yayımlanan bu düzeltme yazısında, yazarın doğru ORCID numarası "0009-0001-3785-2712" olarak güncellenmiştir.

Orijinal makalenin DOI: https://doi.org/10.28948/ngumuh.341813

Erratum

Nigde Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences, in the research article with DOI number "https://doi.org/10.28948/ngumuh.341813", it was understood that the ORCID number was inadvertently misprinted by the author. The author apologizes to the readers for this mistake.

In this correction notice published to address the erroneous ORCID number "0000-0003-2456-1788" given in the original article, the author's correct ORCID number has been updated to "0009-0001-3785-2712".

DOI of original article: https://doi.org/10.28948/ngumuh.341813

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: onurarslan@ibu.edu.tr (O. Arslan)
Geliş / Received: 09.07.2025 Kabul / Accepted: 10.07.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1744525

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Düzeltme Yazısı / Erratum

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Düzeltme Yazısı "Akkaya Barajı'nın Niğde ili iklimine etkisi" [NÖHÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6(2), 627-633, 2017]

Erratum to "Effect of Akkaya Dam on climate in Nigde province" [NOHU Journal of Engineering Sciences 6(2), 627-633, 2017]

Onur Arslan [1,*]

[1] *Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 14100, Bolu, Türkiye*

Düzeltme

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, "https://doi.org/10.28948/ngumuh.341821" DOI numaralı araştırma makalesinde yazar tarafından ORCİD numarasının sehven hatalı olarak yazıldığı anlaşılmıştır. Yapılan bu hatadan dolayı yazar, okuyuculardan özür dilemektedir.

Orijinal makalede "0000-0003-2456-1788" olarak hatalı verilen ORCID numarasının düzeltilmesi amacıyla yayımlanan bu düzeltme yazısında, yazarın doğru ORCID numarası "0009-0001-3785-2712" olarak güncellenmiştir.

Orijinal makalenin DOI: https://doi.org/10.28948/ngumuh.341821

Erratum

Nigde Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences, in the research article with DOI number "https://doi.org/10.28948/ngumuh.341821", it was understood that the ORCİD number was inadvertently misprinted by the author. The author apologizes to the readers for this mistake. .

In this correction notice published to address the erroneous ORCID number "0000-0003-2456-1788" given in the original article, the author's correct ORCID number has been updated to "0009-0001-3785-2712".

DOI of original article: https://doi.org/10.28948/ngumuh.341821

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: onurarslan@ibu.edu.tr (O. Arslan)
Geliş / Received: 09.07.2025 Kabul / Accepted: 10.07.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1744542

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Düzeltme Yazısı / Erratum

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Düzeltme Yazısı "Kapadokya Bölgesi'nin yaz ayları buharlaşma verileri için trend analizi" [NÖHÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(2), 948-953, 2019]

Erratum to "Trend analysis for evaporation data in summer months of Cappadocia Region" [NOHU Journal of Engineering Sciences 8(2), 948-953, 2019]

Onur Arslan [1,*]

[1] *Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 14100, Bolu, Türkiye*

Düzeltme

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, "https://doi.org/10.28948/ngumuh.598070" DOI numaralı araştırma makalesinde yazar tarafından ORCİD numarasının sehven hatalı olarak yazıldığı anlaşılmıştır. Yapılan bu hatadan dolayı yazar, okuyuculardan özür dilemektedir.

Orijinal makalede "0000-0003-2456-1788" olarak hatalı verilen ORCID numarasının düzeltilmesi amacıyla yayımlanan bu düzeltme yazısında, yazarın doğru ORCID numarası "0009-0001-3785-2712" olarak güncellenmiştir.

Orijinal makalenin DOI: https://doi.org/10.28948/ngumuh.598070

Erratum

Nigde Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences, in the research article with DOI number "https://doi.org/10.28948/ngumuh.598070", it was understood that the ORCİD number was inadvertently misprinted by the author. The author apologizes to the readers for this mistake.

In this correction notice published to address the erroneous ORCID number "0000-0003-2456-1788" given in the original article, the author's correct ORCID number has been updated to "0009-0001-3785-2712".

DOI of original article: https://doi.org/10.28948/ngumuh.598070

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: onurarslan@ibu.edu.tr (O. Arslan)
Geliş / Received: 09.07.2025 Kabul / Accepted: 10.07.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1742384