

NÖHÜ MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ NOHU JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

ISSN: 2564-6605

Cilt: 13 Sayı: 4 2024
Volume: 13 Issue: 4 2024



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

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh>
<https://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 Korkaç

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*



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 University, Türkiye*

Prof. Dr. Muhammad Imran Asghar

Hubei Üniversitesi, Çin/*Hubei University, China*

Prof. Dr. Ceyhun Karpuz

Pamukkale Üniversitesi, Türkiye/*Pamukkale University, Türkiye*

Prof. Dr. Cengiz Duran Atış

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.*

Doç. 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*



Editör Kurulu/ Editorial Board

Prof. Dr. Mustafa Sarıdemir (Baş Editör/Editor-in-Chief)	İnşaat Mühendisliği Civil Engineering
Prof. Dr. Mustafa Korkaç (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 Büyükkelik	Endüstri Mühendisliği Industrial Engineering
Doç. Dr. Serkan Çayırılı	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
Dr. Öğr. Üyesi Ehsan Noroozinejad	İnşaat Mühendisliği Civil Engineering
Dr. Öğr. Üyesi Hatice Sinem Şaş Çaycı	Üretim Mühendisliği Manufacturing Engineering



Mizanpaj Editörleri/Composition Layout Editors

Arş. Gör. Kıvanç Karacan	Mekatronik Mühendisliği <i>Mechatronics Engineering</i>
Arş. Gör. Metehan Bulut	İnşaat Mühendisliği <i>Civil Engineering</i>
Arş. Gör. Emre Uçar	Makine Mühendisliği <i>Mechanical Engineering</i>
Arş. Gör. Kübra Nur Gül	Elektrik-Elektronik Mühendisliği <i>Electrical Electronics Engineering</i>
Arş. Gör. Ayşe Erdoğan	Bilgisayar Mühendisliği <i>Computer Engineering</i>
Arş. Gör. Kemal Ulusoy	Çevre Mühendisliği <i>Environmental Engineering</i>

Dil Editörleri/Language Editors

Doç. Dr. Fatih Çelik	İnşaat Mühendisliği <i>Civil Engineering</i>
Doç. Dr. Hande Baltacıoğlu	Gıda Mühendisliği <i>Food Engineering</i>
Doç. Dr. Hasan Erhan Yücel	İnşaat Mühendisliği <i>Civil Engineering</i>
Dr. Öğr. Üyesi Hamdi Muratçobanoğlu	Çevre Mühendisliği <i>Environmental Engineering</i>
Dr. Öğr. Üyesi Ömer Genç	Makine Mühendisliği <i>Mechanical Engineering</i>
Dr. Öğr. Üyesi Recep Yıldız	Elektrik-Elektronik Mühendisliği <i>Electrical Electronics Engineering</i>



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





İÇİNDEKİLER/CONTENTS

Research Article /Araştırma Makalesi

Fabrication and analysis of ZnO and Al-doped ZnO films using the SILAR technique

ZnO ve Al-katkılı ZnO filmlerin SILAR tekniğiyle üretimi ve analizleri

İlker Kara, Abjar Ibrahim Rashid Hafedh, Ihsan Sadeq Raheem Waeli

1074-1079

Research Article /Araştırma Makalesi

Auction-based distributed task allocation algorithm for drone swarms

Dron sürüleri için müzakere tabanlı dağıtık görev atama algoritması

Mutullah Eşer, Asım Egemen Yılmaz

1080-1092

Research Article /Araştırma Makalesi

The effects of sensor and feature level fusion methods in multimodal emotion analysis

Çok modlu duygu analizinde sensör ve özellik seviyesi füzyon yöntemlerinin etkileri

Bahar Hatipoğlu Yılmaz, Cemal Köse

1093-1099

Research Article /Araştırma Makalesi

Automated fabric inspection system development aided with convolutional autoencoder-based defect detection

Evrışimli otokodlayıcı tabanlı hata tespiti ile desteklenen otomatik kumaş inceleme sistemi geliştirilmesi

Muharrem Mercimek, Muhammed Ali Nur Öz, Özgür Turay Kaymakçı

1100-1114

Araştırma Makalesi/Research Article

Eskişehir’de hava kirliliği: PM10, PM2.5 ve SO2 konsantrasyonlarının mekânsal-zamansal değişimi ve kaynaklarının değerlendirilmesi

Air pollution in Eskişehir: Spatio-temporal variation of PM10, PM2.5, and SO2 concentrations and evaluation of sources

İlker Balçılar

1115-1126

Araştırma Makalesi/Research Article

Germanyum piramit dizisinin etkin yüzey silanizasyonu ve floresan etiketlenmesi: Optimizasyon ve karakterizasyon

Efficient surface silanization and fluorescent labelling of germanium pyramid array: Optimization and characterization

Sabriye Açıkgöz, Hasan Yüngeviş, Ayşegül Şahin, Emin Özunal

1127-1138

Research Article /Araştırma Makalesi

Evaluating the impact of sonication process on graphene oxide structural properties

Sonikasyon işleminin grafen oksit yapısal özellikleri üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi

Fatih Sargin, Funda Ak Azem, Kursat Kanbur, Isil Birlik, Ahmet Turk

1139-1149



Araştırma Makalesi/Research Article

Görme bozukluğu olan bireyler için derin öğrenme tabanlı ürün sınıflandırma sistemi

Deep learning based product classification for individuals with visual impairment system

Fatma Betül Keskin, Nursena Baygın, Işıl Karabey Aksakallı, Özlem Sökmen

1150-1160

Araştırma Makalesi/Research Article

Bir FTTH yapısını, OFSD kurgusu ile tasarlama

Designing an FTTH structure with an OFSD setup

Turgay Karacan, Bekir Sami Tezekiçi

1161-1167

Araştırma Makalesi/Research Article

Ilgın sahası (Konya) Miyosen yaşlı bitümlü kiltaşlarında organofil element incelemeleri: Besin girdisi ve paleo-
üretkenliğin etkisi

*Organophile element investigations in Miocene bituminous claystones of Ilgın field (Konya): Effect of nutrient input and
paleo-productivity*

Ali Sarı, Kamal İsmayılzada, Sinan Akıska, Fuat Erol

1168-1183

Research Article /Araştırma Makalesi

Simultaneous flight control system and twist-morphing wing design of an unmanned aerial vehicle

Bir insansız hava aracının eşzamanlı uçuş kontrol sistemi ve burularak-başkalaşabilen kanat tasarımı

Yüksel Eraslan, Tuğrul Oktay

1184-1191

Research Article /Araştırma Makalesi

A design template for globally stable nonlinear oscillators with multiple dynamics

Çoklu dinamiklere sahip global kararlı lineer olmayan osilatörler için bir tasarım şablonu

İsmail Öztürk

1192-1200

Research Article /Araştırma Makalesi

Determination of quality characteristics of some Monofloral, Polyfloral and Honeydew honeys in terms of physical
properties and Proline content

Fiziksel özellikler ve Prolin içeriği bakımından bazı Monofloral, Polifloral ve Salgı ballarının kalite özelliklerinin tespiti

Merve Özbay, Fatma Nur Arslan, Gazi Görür

1201-1206

Araştırma Makalesi/Research Article

TinyML tabanlı görsel işitsel anahtar kelime tespiti

TinyML based audio visual keyword detection

Mehmet Tosun, Hamit Erdem

1207-1215



Research Article / Araştırma Makalesi

Comparison of the accuracy performances of the Gemini Advanced, the GPT-4, the Copilot, and the GPT-3.5 models in medical imaging systems: A Zero-shot prompting analysis

Tıbbi görüntüleme sistemlerinde Gemini Advanced, GPT-4, Copilot ve GPT-3.5 modellerinin doğruluk performanslarının karşılaştırılması: Sıfır atışlı yönlendirme analizi

Alpaslan Koç, Ayşe Betül Öztiryaki

1216-1223

Research Article / Araştırma Makalesi

Phase shifter intelligent reflective surface design for 2.4 GHz

2.4 GHz için faz kaydırıcı akıllı yansıtıcı yüzey tasarımı

Yasin Can Tekkol, Ayşe Elif Canbilen

1224-1230

Araştırma Makalesi / Research Article

Akışkan viskoz sönümleyicilerin bitişik nizamlı betonarme binalarda gerekli boşluk mesafesine etkisi

The effect on required gap distance in adjacent reinforced concrete buildings of fluid viscous dampers

Esra Özer

1231-1239

Araştırma Makalesi / Research Article

Derin öğrenme yöntemleri kullanılarak deri lezyon görüntülerinden Maymun Çiçeği hastalığının tespiti

Detection of Monkeypox disease from skin lesion images using deep learning methods

Muhammet Talha Engin, Kemal Adem

1240-1252

Research Article / Araştırma Makalesi

Assessing the evolution of urban expansion density over a century, Konya, Türkiye

Kentsel yayılma yoğunluğunun yüzyıldaki gelişiminin değerlendirilmesi, Konya, Türkiye

Gülsüm Eloğlu, Kadir Şahbaz, Aslı Bozdağ

1253-1263

Araştırma Makalesi / Research Article

6 Şubat depremlerinden etkilenen şehirlere ait OpenStreetMap verilerinin niceliksel ve semantik analizi

Quantitative and semantic analysis of OpenStreetMap data for cities affected by the February 6 earthquakes

Abdulkadir Memduhoğlu

1264-1276

Research Article / Araştırma Makalesi

Groundwater level estimation with analytical hierarchy method

Analitik hiyerarşi yöntemi ile yeraltı suyu seviyesi tahmini

Burak Gül, Mehmet Hayrullah Akyıldız

1277-1290

Research Article/Araştırma Makalesi

Green inhibition effect of *Pyracantha coccinea* (Rosaceae) berries in assessing of acidic corrosion of iron

Demirin asidik korozyonunu değerlendirmede Pyracantha coccinea (Rosaceae) meyvelerinin yeşil inhibisyon etkisi

Demet Özkır

1291-1297

Research Article/Araştırma Makalesi

IoT-based fire detection: A comparative study of machine learning techniques

IoT-tabanlı yangın tespiti: Makine öğrenmesi tekniklerinin karşılaştırmalı çalışması

Ahmet Aytuğ Ayrancı, Burcu Erkmen

1298-1307

Araştırma Makalesi/Research Article

Lityum-İyon pilin anlık gerilim, akım, güç ve sıcaklık değerlerinin Arduino üzerinden C# programlama dilinde elde edilen verilere dayalı olarak analiz edilmesi

Analyzing instantaneous voltage, current, power, and temperature values of a Lithium-Ion battery based on data obtained via Arduino in C# programming language

Sercan Taşdelen, Batuhan Gökkuş, Sezer Ulukaya

1308-1314

Araştırma Makalesi/Research Article

MIMO-FBMC/OQAM sisteminde ayrık guguk kuşu arama algoritması kullanılarak sembol vektörlerinin algılanması

Detection of symbol vectors using discrete cuckoo search algorithm in MIMO-FBMC/OQAM system

Şakir Şimşir

1315-1326

Research Article/Araştırma Makalesi

Machine learning-based identification of the strongest predictive features of scoring penalty kick in football

Futbolda başarılı penaltı atışı için en güçlü belirleyici özniteliklerin makine öğrenimi tabanlı tespiti

Ural Akıncıoğlu, Önder Aydemir, Ahmet Çil

1327-1335

Araştırma Makalesi/Research Article

Kayacı oluşturan bileşenlerin Leeb sertliğine etkisi

The effect of rock components on Leeb hardness

Mehmet Can Balcı, İsmail İnce

1336-1341

Araştırma Makalesi/Research Article

Fraksiyonel dereceli osilatörlerin pratik gerçekleştirimi için bir yaklaşım

An approach for practical realization of fractional-order oscillators

İbrahim Ethem Saçu

1342-1346

Araştırma Makalesi/Research Article

Derin öğrenme ile panoramik radyografi görüntülerinden diş segmentasyonu: UNet, FPN ve PSPNet karşılaştırması

Tooth segmentation from panoramic radiography images with deep learning: comparison of UNet, FPN and PSPNet

Salih Taha Alperen Özçelik, Hüseyin Üzen, Abdülkadir Şengür, Adalet Çelebi

1347-1354



Araştırma Makalesi/Research Article

Sert kabuklu araç üstü kamp çadırının aerodinamik tasarımı ve analizi

Aerodynamic design and analysis of a hard-shell rooftop camping tent

Özkan Özmen, Mümin Özden

1355-1363

Araştırma Makalesi/Research Article

cZIF-8/Ti₃C₂ nanokompozitlerle kükürt katot üretimi ve lityum-sülfür bataryalarda kullanımı

Fabrication of sulfur cathode with cZIF-8/Ti₃C₂ nanocomposites and its use in lithium-sulfur batteries

Recep Yüksel

1364-1371

Araştırma Makalesi/Research Article

Arazi kullanımı ve arazi örtüsü belirleme çalışmalarında nesne tabanlı ve piksel tabanlı sınıflandırma yöntemlerinin karşılaştırılması: Yedigöze Baraj Gölü ve çevresi örneği

Comparison of object based and pixel based classification methods in land use and land cover determination studies: The case of Yedigoze Reservoir Area

Sevim Yasemin Çiçekli

1372-1381

Araştırma Makalesi/Research Article

Rölanti koşullarında çalışan benzinli bir motorun performans ve emisyonlarına asetilenin etkisi

Effect of acetylene on the performance and emissions of a gasoline engine operating under idle conditions

Mehmet İlhan İlhak

1382-1388

Araştırma Makalesi/Research Article

Uçan nesnelerin THz haberleşmesi

Flying things in THz communication

İsmail Ersin, Mustafa Akkaş, Orhan Dağdeviren

1389-1399

Araştırma Makalesi/Research Article

Güneş panellerinin üretim ve kurulum süreçlerinde verimliliği belirleyen faktörlerin analizi

Analysis of factors determining efficiency in the production and installation processes of solar panels

Gamze Güven, Ayşe Kocalmış Bilhan

1400-1407

Research Article/Araştırma Makalesi

DFT analysis of salicylideneaniline derivatives as corrosion inhibitors for mild steel

Yumuşak çelik için korozyon inhibitörleri olarak salisilidenanilin türevlerinin DFT analizi

Mehmet Erman Mert, Başak Doğru Mert

1408-1419



Araştırma Makalesi/Research Article

AlSi10Mg alaşımının içyapı ve mekanik özellikleri üzerine sıcak presleme yönteminin etkisi

Effect of hot pressing method on the microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg alloy

Murat Beder

1420-1427

Araştırma Makalesi/Research Article

İndiyum katkılı LATP katı elektrolitinin yapısı ve katkılamanın iyonik iletkenlik üzerindeki etkisi

Structure of indium-doped LATP solid electrolyte and effect of doping on ionic conductivity

Fatih Öksüzoğlu, Gültekin Çelik

1428-1434

Research Article/Araştırma Makalesi

The comparison study of PI and Sliding Mode control techniques for Buck-Boost converters

Kayan tipli denetim ve PI kontrol tekniklerinin Düşüren-Yükselten dönüştürücü için karşılaştırılması

Salah Hilo Al-Attwani, Mustafa Teke, Enes Bektaş, Ethar Sulaiman Y. Yaseen, Yasin Bektaş, Zafer Civelek

1435-1442

Research Article/Araştırma Makalesi

Comparative analysis of different LED lamps with reference to EU's ecodesign and energy labeling regulations in Türkiye

Türkiye'deki farklı LED lambalarının AB'nin eko tasarım ve enerji etiketleme düzenlemeleri bağlamında karşılaştırmalı analizi

Zühal Polat, Haydar Bayar, Erkan Dursun

1443-1451

Research Article/Araştırma Makalesi

Inspection of the accuracy of fringe projection profilometry by using hybrid methods

Hibrit metotlar kullanarak ızgara projeksiyon profilemetrisinin doğruluğunun incelenmesi

Burak Özbay, Zehra Saraç

1452-1467

Araştırma Makalesi/Research Article

Uygun maliyetli seyrekliğe duyarlı akustik geri besleme giderici

Cost-effective sparsity aware acoustic feedback canceller

Yusuf Eren, Engin Cemal Mengüç

1468-1477

Araştırma Makalesi/Research Article

Elektrikli araçlar için farklı hız profilleri altında model öngörülü akım kontrollü İSMMSM sürücüsünün başarımı

Performance of model predictive current controlled IPMSM drive under different speed profiles for electric vehicles

Rıdvan Demir

1478-1484

Araştırma Makalesi/Research Article

Kompleks bir Pb-Zn cevherinin sülfürik asit çözeltisinde liçi

Leaching of a complex Pb-Zn ore in sulfuric acid solution

Safak Ozsarac, Sait Kursunoglu, Soner Top, Mahmut Altiner, Shokrullah Hussaini, Hasan Serkan Gokcen, Muammer Kaya

1485-1491

Research Article/Araştırma Makalesi

Investigation of cake production with the addition of lupin (*Lupinus albus*) flour

Terme (Lupinus albus) unu ilavesi ile kek üretiminin araştırılması

Sinem Gökal, Mehmet Yetişen, Cem Baltacıoğlu

1492-1497

Araştırma Makalesi/Research Article

Eriyik yığıma modelleme ile farklı yazdırma parametrelerinde üretilen yapıların titreşim sönümlenme özelliklerinin torna tezgâhı üzerinde deneysel araştırılması

Experimental investigation of the vibration damping properties of structures produced with different printing parameters on a lathe using fused deposition modeling

Çağlar Sevim, Mehmet Parlak

1498-1503

Araştırma Makalesi/Research Article

Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynakları açısından hidroelektrik ve güneş enerjisinin bölgesel ve iller bazında incelenmesi

An evaluation of hydroelectric and solar energy as renewable energy sources across regions and provinces in Türkiye

Ömer Bilhan

1504-1516

Research Article/Araştırma Makalesi

Numerical analysis of debris cloud formation in UHMWPE wavy plates during hypervelocity impact

Hiper hız darbesi sırasında UHMWPE dalgalı plakalarda enkaz bulutu oluşumunun nümerik analizi

Asım Önder

1517-1525

Araştırma Makalesi/Research Article

Jeokimyasal süreçler ve yeraltısuyu kimyası: Akçşehir Ovası (Karaman) örneği

Geochemical processes and groundwater chemistry: A case study Akçşehir Plain (Karaman)

Ayşen Davraz, Fatma Aksever

1526-1537

Research Article/Araştırma Makalesi

Prediction of polarization curves of PEMFC membrane electrode assembly using artificial intelligence technics

Yapay zeka teknikleriyle PEMFC membran elektrot yapısının polarizasyon eğrilerinin tahmini

Haydar Bayar, Erkan Dursun

1538-1544

Research Article/Araştırma Makalesi

Proteogenomic profiling of lung adenocarcinoma reveals therapeutic targets for precision medicine

Akciğer adenokarsinomunun proteogenomik analizi: hassas tıp için terapötik hedeflerin belirlenmesi

Abdulkadir Elmas

1545-1552



Fabrication and analysis of ZnO and Al-doped ZnO films using the SILAR technique

ZnO ve Al-katkılı ZnO filmlerin SILAR tekniğiyle üretimi ve analizleri

İlker Kara^{1,*} , Abjar Ibrahim Rashid Hafedh² , Ihsan Sadeq Raheem Waeli³ 

¹ Çankırı Karatekin University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, 18100 Çankırı, Türkiye

Abstract

In this study, pure ZnO and Al-doped ZnO thin films at different concentrations were successfully grown on an ITO substrate using the SILAR method. The produced thin films were characterized by SEM/EDS, XRD, and UV-Vis spectroscopy. According to the XRD analysis results, it was observed that the produced thin films crystallized on a nanometer scale, and the crystallization quality varied depending on the concentration of Al doping. SEM/EDS analysis results indicated that Al-doped ZnO thin films affected the morphology, forming nano-root structures. UV-Vis analysis results showed that the band gap values of the thin films produced varied depending on the Al dopant, with decreased values, sharper absorption edges, and increased absorption intensities.

Anahtar kelimeler: SILAR metot, Çinko oksit, Al katkılı ZnO

1 Introduction

In recent years, the development of functional materials for various technological applications has garnered significant interest among researchers [1-3]. ZnO thin films, in particular, have emerged as promising candidates for diverse applications due to their unique properties, including wide bandgap, high electron mobility, and transparency in the visible region [3-5]. ZnO thin films are renowned for their wide bandgap, high electron mobility, optical transparency, and remarkable piezoelectric properties, rendering them indispensable in numerous cutting-edge technologies [6]. The incorporation of dopant elements such as aluminum (Al) into ZnO thin films further enhances their functionalities, leading to tailored material properties suitable for specific applications [7].

ZnO thin films hold a pivotal position in diverse technological applications owing to their unique optical and electronic properties [8,9]. These properties, including a wide bandgap and high electron mobility, render them indispensable in various optoelectronic devices such as solar cells, light-emitting diodes (LEDs), lasers, and sensors [10]. Additionally, ZnO thin films exhibit excellent transparency in the visible spectrum and mechanical robustness, making them ideal candidates for transparent and flexible electronics, including touchscreens and smart windows [11]. Moreover, their potential in environmental and biomedical

Öz

Bu çalışmada, farklı konsantrasyonlarda saf ZnO (Çinko Oksit) ve Al-katkılı ZnO ince filmler, ITO tabanı üzerine SILAR yöntemi ile başarıyla büyütüldü. Üretilen ince filmler SEM/EDS, XRD ve UV-Vis spektroskopisi ile karakterize edilmiştir. XRD analizi sonuçlarına göre, üretilen ince filmlerin nanometre ölçeğinde kristalleştiği ve kristalleşme kalitesinin Al-katkı konsantrasyonuna bağlı olarak değiştiği gözlemlendi. SEM/EDS analizi sonuçları, Al-katkılı ZnO ince filmlerin morfolojisi üzerinde etkilemiş olup nano-kök yapılar oluşturulmuştur. UV-Vis analizi sonuçları, Al-katkı maddesine bağlı olarak üretilen ince filmlerin yasak enerji aralığı değerleri azalmış, soğurma kenarının keskinleştiği ve soğurma yoğunluğunun arttığı gözlemlendi.

Keywords: SILAR method, Zinc oxide, Al doped ZnO

applications, such as gas sensing and bioelectronics, further underscores their significance in contemporary research and industry.

The fabrication of ZnO thin films requires careful consideration of growth techniques to achieve the desired film properties. Among these techniques, Physical Vapor Deposition (PVD), Chemical Vapor Deposition (CVD), and solution-based methods such as the Sequential Ionic Layer Adsorption and Reaction (SILAR) technique stand out [12]. Each technique offers distinct advantages and challenges, influencing its suitability for specific applications and film characteristics [13]. For instance, PVD techniques ensure precise control over film thickness and composition, while solution-based methods like SILAR offer cost-effective and scalable approaches for large-scale production.

The application areas of ZnO compound encompass a wide array of fields. Among the most commonly preferred application areas are gas sensors, photodetectors, solar cells, light-emitting devices (LEDs), and laser systems [14]. Additionally, permeable ZnO thin films doped with elements such as aluminum and gallium exhibit excellent electrical conductivity [15].

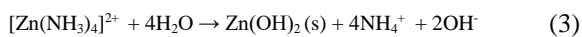
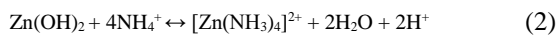
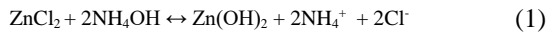
The addition of Aluminium induces significant alterations in the electrical and optical characteristics of ZnO thin films. Notably, the electrical resistivity of all films increases with radiation dose. Moreover, the annealing environment during thin film production exerts a notable

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: karaikab@gmail.com (I. Kara)

Geliş / Received: 18.02.2024 Kabul / Accepted: 06.05.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1439098

influence on both electrical and optical properties. The annealing process has a more significant impact on these properties compared to ambient conditions and the increase in the Al additive ratio. [16]. The study highlights that Al doping leads to substantial variations in the electrical properties of ZnO thin films. Furthermore, the optical transmittance behavior underscores a blue-shift in the absorption edge, resulting in heightened electrical resistance and electron trapping rather than oxygen atom vacancies [16].



In the study conducted, it was observed that the particle sizes of Al-doped ZnO thin films increased [17]. Additionally, the energy band gaps of the resulting thin films were narrowed with the introduction of Al. Furthermore, it was concluded that the onset of absorption shifted towards longer wavelengths as a result of Al doping.

It was noted that the absorption edge experienced a blue shift with the intensification of Al doping in ZnO thin films. Additionally, the permeability demonstrated a decrease with the escalation of annealing temperature. This phenomenon of the absorption edge is referred to as the Burstein-Moss Effect [18].

In this context, this study aims to explore and elucidate the growth mechanisms and properties of undoped ZnO and Al-ZnO thin films deposited via the SILAR method. Through comprehensive characterization using techniques such as SEM, XRD, and UV-vis, insights into the influence of Al doping concentration on the structural and optical properties of ZnO thin films will be gained. The findings of this study are expected to contribute to the optimization of growth processes and the design of ZnO-based materials for advanced technological applications.

2 Materials and methods

The Sequential Ionic Layer Adsorption and Reaction (SILAR) method stands out as a versatile and cost-effective approach for thin film fabrication [3]. Widely utilized across scientific research and various disciplines, including materials science, solar cells, sensors, and optoelectronic devices, SILAR offers a straightforward and accessible means to precisely control thin film growth and tailor their properties. In this thesis study, the SILAR method was chosen for the fabrication of both undoped ZnO films and ZnO films doped with Al due to its suitability and effectiveness in achieving the desired film characteristics.

2.1 Preparation of substrate materials

In this study, thin films of undoped ZnO, as well as ZnO doped with Sn and Cu, were deposited onto ITO substrates. The ITO-coated glass substrates used were of the TEC8 model, measuring 25 mm x 25 mm with a thickness of 2 mm. Prior to deposition, the ITO-coated glasses underwent a thorough cleaning process. Initially, they were rinsed in a

soapy water solution to remove any surface contaminants. Subsequently, the glass substrates with ITO coatings were subjected to ultrasonic cleaning using acetone for a duration of ten minutes. Following this, they were further cleaned with ultrasonication in a 1:1 ethanol-water solution for an additional ten minutes.

2.1.1 Production process

The growth of ZnO thin films on the ITO substrate utilized the $[\text{Zn(NH}_3)_4]^{2+}$ zinc-ammonia complex. To prepare this complex solution, a mixture of 0.1 M ZnCl_2 ($\text{pH} \approx 5.5$) and 25 - 28 % NH_3 solutions was combined in a 1 to 10 molar ratio $[\text{Zn}:\text{NH}_3=1:10]$ (Figure 1). Chemical reactions occurring during the thin film growth phase are elucidated by Equations (1), (2), and (3) [8].

To fabricate films of Al-doped ZnO the ITO substrate underwent a thorough cleaning process. Subsequently, solutions were prepared according to the specified additive ratio. Utilizing the SILAR approach, thin films of zinc oxide (ZnO) doped with tin and copper were deposited onto the indium tin oxide (ITO) substrate.

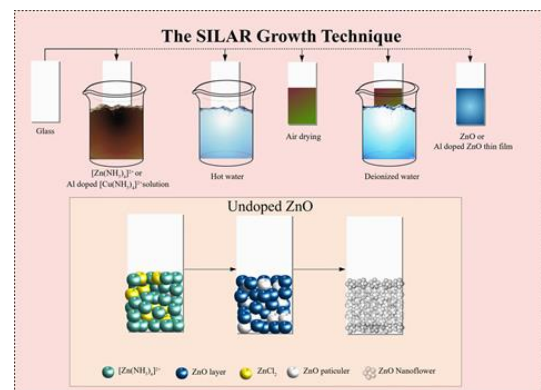


Figure 1. Mechanism of growth of ZnO thin films on ITO substrate by SILAR technique

The research focused on investigating the structural, surface, and optical characteristics of ZnO and Al-doped ZnO films deposited on an ITO substrate. To characterize these attributes comprehensively, a range of imaging techniques was employed, including X-ray diffractometry, FESEM, UV-Vis, and current-voltage measurements. UV-Vis analyses provided absorbance and transmittance spectra, which were utilized to calculate the band structure and band gap energies of the films. XRD analyses were performed using an APD 2000 PRO XRD device to examine the crystallinity levels, half-peak widths, and Miller indices of the films.

3 Results and discussion

Al-doped ZnO samples, with doping concentrations of 1%, 2%, and 3%, were deposited using the SILAR method, involving 40 deposition cycles. Subsequently, the samples were subjected to annealing at 300 °C for 13 minutes.

Figure 2 shows the X-ray diffraction (XRD) analyses of the produced thin films, including (a) undoped ZnO, (b) ZnO with 1% Al doping, (c) ZnO with 2% Al doping, and (d) ZnO with 3% Al doping. The dominant diffraction peaks of

SnO:In(ITO) below, indicating the tetragonal crystal structure, are oriented in the (101) direction. It was observed that as the amount of Al additive increased, the peak intensities of the films increased while the half peak widths decreased. This suggests that the crystallization levels of the produced thin films vary depending on the Al additive ratio. Upon examination of the crystallization levels of the films, it was found that the ITO/ZnO/Al 3% film exhibited the best compatibility with the ITO layer.

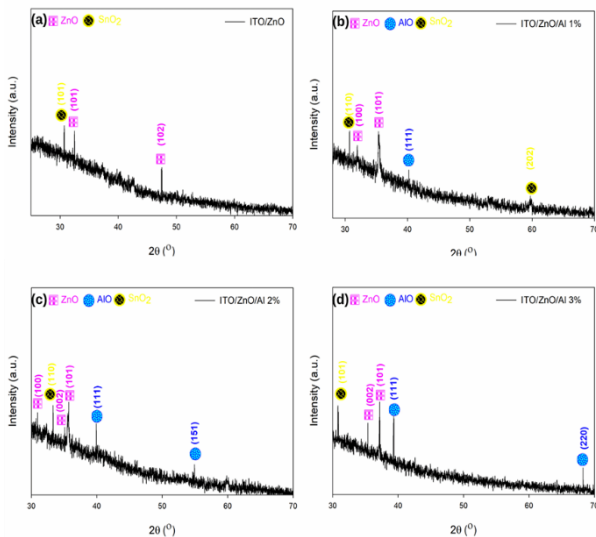


Figure 2. XRD analysis of produced (a) undoped ZnO, (b) ZnO 1% Al, (c) ZnO 2% Al, (d) ZnO 3% Al thin films

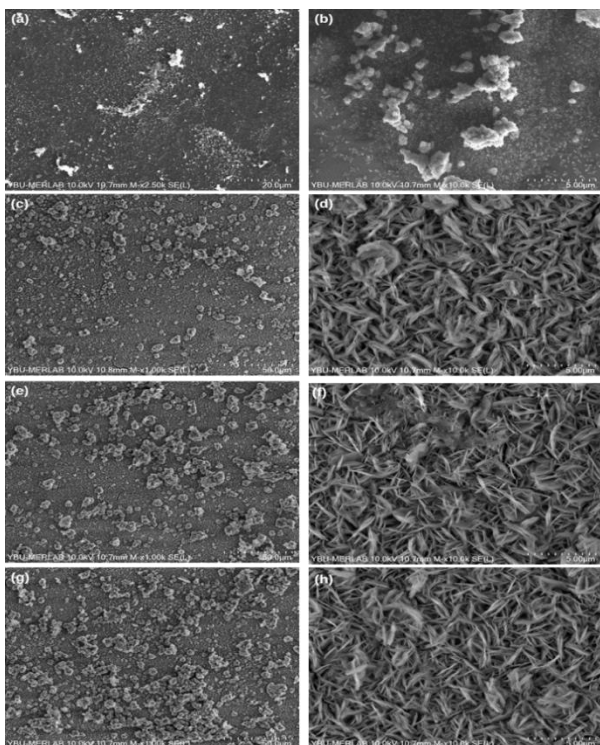


Figure 3. SEM images of produced (a, b) undoped ZnO, (c, d) ZnO 1% Al, (e, f) ZnO 2% Al, (g, h) ZnO 3% Al thin films

Sequential analyses were conducted on the thin films produced, with each doping ratio examined individually. **Figure 3** presents scanning electron microscopy (SEM) images of both the undoped ZnO and Al-doped ZnO thin films, including 1%, 2%, and 3% doping levels.

It was observed that the Al (1%, 2%, 3%) doped ZnO thin film samples exhibited a more uniform tendency for aggregation on the ITO surface. The surface morphology was characterized by nano-root-shaped structures, with the prevalence of these structures increasing as the Al doping ratio rose. However, the average grain size was observed to decrease with a lower Al additive ratio. Upon comparing the SEM images of the produced thin film samples, it was evident that the nano-root structure of the 3% Al-doped sample was more pronounced, with a reduction in gaps within the structure. This led to an increase in surface roughness, a desirable feature in certain sensor applications. Particularly in gas sensor applications, high surface roughness is advantageous.

EDS measurements were conducted to analyze the elemental contribution and composition ratios of both the undoped ZnO and Al-doped ZnO thin films. **Figure 4** shows the EDS images of these thin films, including undoped ZnO and Al doping levels of 1%, 2%, and 3%.

The EDS spectra of the thin films reveal the presence of Mg, Si, O, C, and Na elements. When analyzing the produced thin films using EDS, variations were observed in the ratios of Zn, O, C, and Al elements in the samples depending on the Al additive ratio. The presence of Si, Na, and C elements in the EDS analyses can be attributed to the ITO substrate material. Additionally, the presence of Mg is likely due to impurities introduced during the fabrication process.

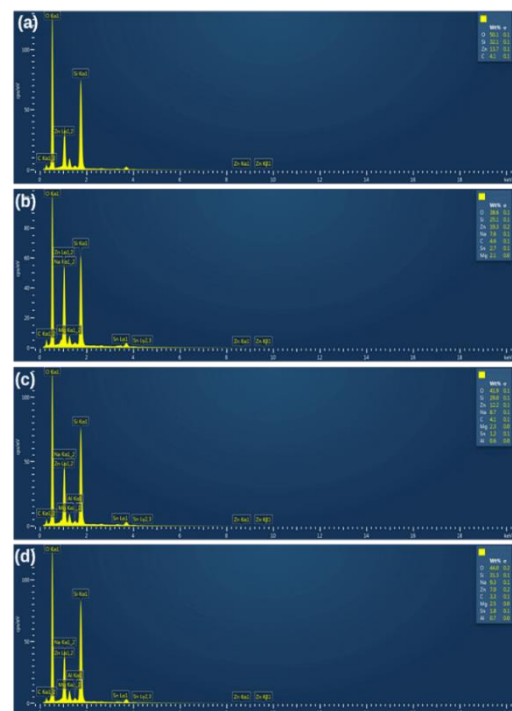


Figure 4. EDS images of produced (a) undoped ZnO, (b) ZnO 1% Al, (c) ZnO 2% Al, (d) ZnO 3% Al thin films

Figure 5 shows the absorption spectrum obtained from absorption measurements taken at room temperature for both undoped ZnO and Al-doped ZnO thin films fabricated using the SILAR technique. By utilizing the absorption measurements provided in Figure 5, the energy-dependent graph of $(\alpha h\nu)^2$ (eVcm^{-1})² was derived, as depicted in Figure 4.5. This figure showcases the forbidden energy gaps (E_g) of undoped ZnO and Al-doped ZnO thin films.

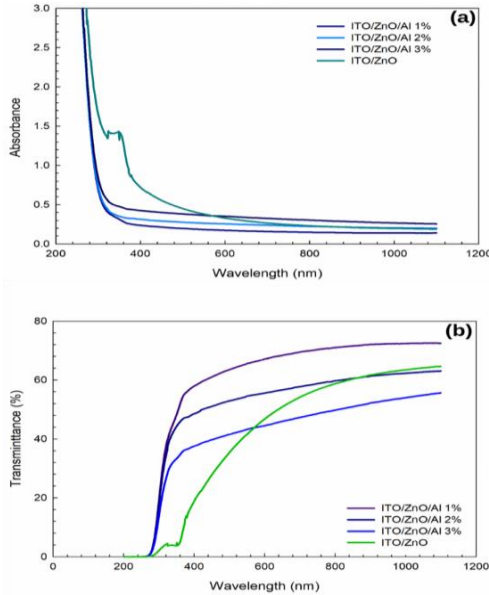


Figure 5. Energy dependent plots of $(\alpha h\nu)^2$ (eVcm^{-1})² plotted using optical absorption measurements of undoped ZnO and Al (1%, 2%, 3%) doped ZnO thin films (a) Absorbance, (b) Transmittance

Moreover, in Figure 6, the Urbach energy (E_u) was calculated from the slopes of the linear regions of (E_u) of L_{na} to $(h\nu)$. Table 1 below presents the E_g and E_u energies of the produced thin films corresponding to the Al additive ratio.

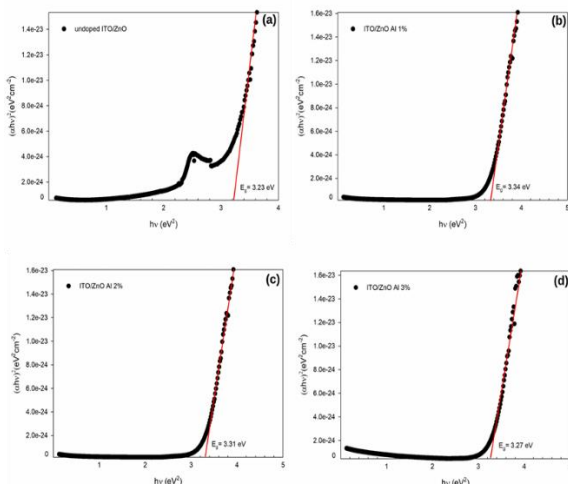


Figure 6. Graph of energy dependent forbidden band energy gap plotted using optical absorption measurements of thin films $(\alpha h\nu)^2$ (eVcm^{-1})²

Table 1. Forbidden energy (E_g) and Urbach (E_u) values calculated from the energy dependent graphs of $(\alpha h\nu)^2$ (eVcm^{-1})² drawn using optical absorption measurements of undoped ZnO and Al (1%, 2%, 3%) doped ZnO thin films

Samples	E_g (eV)	E_u (meV)
Undoped ITO/ZnO	3.23	134.84
ITO/ZnO/Al 1 %	3.34	120.81
ITO/ZnO/Al 2 %	3.31	122.80
ITO/ZnO/Al 3 %	3.27	125.73

Table 1 presents the calculated forbidden energy values obtained from the $(\alpha h\nu)^2$ (eVcm^{-1})² energy graphs plotted using optical absorption measurements of undoped ITO/ZnO, as well as ITO/ZnO/Al (1%, 2%, 3%) doped ZnO thin films. It was observed that the forbidden energy gap values of the thin films, produced by incorporating Al into ZnO, varied depending on the doping level. Specifically, as the Al doping ratio increased, the forbidden energy gap values of the resulting thin films decreased. Additionally, it was noted that the absorption edge became sharper, while the absorption intensity increased.

This decrease in the forbidden energy gap value with respect to the Al-doping ratio can be attributed to the enhancement of crystallinity and surface properties of the produced thin films, along with an increase in grain size. According to Arif (2019), the particle sizes of Al-doped ZnO thin films were reported to increase. Furthermore, the energy band gaps of the resulting thin films narrowed with the inclusion of Al, leading to a shift in the onset of absorption towards longer wavelengths [18].

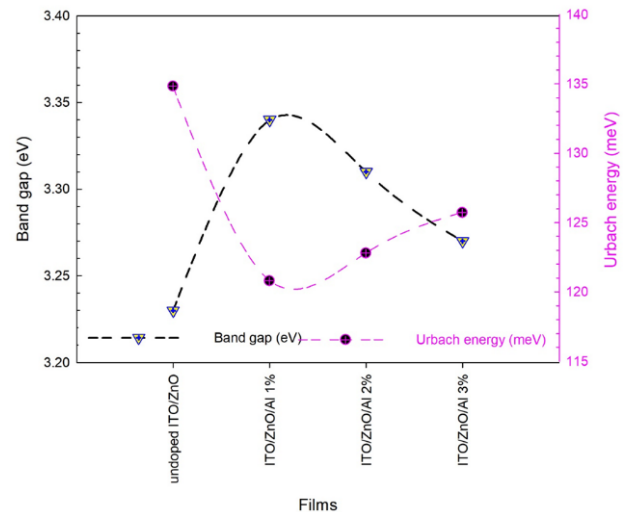


Figure 7. Band gap and Urbach energy graph of undoped ITO/ZnO, ITO/ZnO Al 1%, ITO/ZnO Al 2%, and ITO/ZnO 3% ZnO thin films

As seen in Table 1, a decrease in the forbidden energy gaps of the thin films was observed with an increase in the Al doping ratios of both undoped ITO/ZnO and ITO/ZnO/Al (1%, 2%, 3%) doped thin films. However, an increase in the Urbach energy (E_u) values was noted corresponding to the

Al additive ratio of the produced thin films. Figure 7 illustrates a decrease in E_g values and an increase in E_u values depending on the Al contribution ratio. It is expected that E_g decreases and E_u increases with Al-doping [19]. This observation aligns with the anticipated behavior where the band gap energy of Al-doped ZnO thin films is smaller than that of undoped ZnO thin films, attributed to the Burstein-Moss shift [19]. Furthermore, with an increasing Al-doping ratio, the Fermi energy level of ITO/ZnO/Al shifts towards the conduction band, leading to a decrease in the forbidden energy gap as illustrated in Figure 7.

4 Conclusion

In this study, undoped ITO/ZnO and Al (1%, 2%, 3%) doped ITO/ZnO thin films were fabricated on ITO substrates using the SILAR method. The primary objective of this study was to investigate the structural, morphological, and optical properties of both undoped ITO/ZnO and Al-doped ITO/ZnO thin films.

In XRD analysis, undoped ITO/ZnO and Al-doped ITO/ZnO thin films grown on ITO substrates showed increased peak intensities and decreased half-peak widths with rising Al-doping levels. Additionally, doped films exhibited decreased peak intensities and increased half-peak widths compared to undoped films.

SEM images of Al-doped ITO/ZnO samples revealed a nano-root structure, notably more pronounced in the 3% Al-doped ITO/ZnO sample. However, an increase in the Al additive ratio was associated with a decrease in the average grain size.

Upon examination of optical absorption measurements for Al (1%, 2%, 3%) doped ITO/ZnO thin films produced on ITO substrates, it was noted that the forbidden energy gap values of the films decreased with increasing Al-doping ratio. As the Al additive ratio increased, the forbidden energy gap values of the thin film samples decreased, leading to a sharper absorption edge and increased absorption intensity. This decrease in the forbidden energy gap of the produced thin films can be attributed to the improvement in film crystallinity and surface properties, as well as an increase in grain size.

Upon evaluating the results of the analyses conducted within the scope of the study, it was evident that alterations in the Al-doping ratios led to discernible modifications in the characteristic structure of the resulting thin films.

The results of this study can provide important contributions to practical applications. The increased particle sizes and decreased energy band gap of Al-doped ZnO thin films can be utilized in many potential applications such as solar cells, semiconductor devices, and optoelectronic components. Especially in materials science and engineering research and applications, Al-doped ZnO materials can be evaluated as a potential candidate.

Conflict of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): %20

References

- [1] H. R. Khan, R. Akram, M. Aamir, M.A. Malik, A.A. Tahir, M.A. Choudhary, J. Akhtar. Investigations of photoelectrochemical performance of polycrystalline Bi-doped ZnO thin films. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 181, 111529. <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2023.111529>.
- [2] C. J. C. Singh, J. Samuel, C. S. Biju, S. S. J. Dhas, S. Usharani. Effect of Sn doping on the structural, photoluminescence, ultraviolet filtering and antibacterial activity of ZnO nanorods. *Optical and Quantum Electronics*, 55 (12), 1072, 2023.
- [3] A. Kompa, B.L. Devi, U. Chaitra. Determination of optical constants of vacuum annealed ZnO thin films using Wemple Di Domenico model, Sellmier's model and Miller's generalized rules. *Materials Chemistry and Physics*, 299, 127507, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127507>.
- [4] J. M. Bian, X. M. Li, X. D. Gao, W. D. Yu, L. D. Chen. Deposition and electrical properties of N-In codoped p-type ZnO films by ultrasonic spray pyrolysis. *Applied Physics Letters*, 84 (4), 541-543, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2023.139958>.
- [5] I. C. B. Rodriguez, B. El Filali, T. Torchynska, J. Douda, I. R. Ibarra. Optical and structural properties of Sn doped ZnO thin films synthesized by spray pyrolysis. *MRS Advances*, 8 (24), 1434-1437, 2023. <https://doi.org/10.1557/s43580-023-00673-4>.
- [6] P. Dhamodharan, C. Manoharan, Dhanapandian, S.M. Bououdina, S. Ramalingam. Preparation and characterization of spray deposited Sn-doped ZnO thin films onto ITO substrates as photoanode in dye sensitized solar cell. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26, 4830-4839, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10854-015-2990-7>.
- [7] A. A. El-Fadl, G. A. Mohamad, A. B., Abd El-Moiz, M. Rashad. Optical constants of Zn1-xLixO films prepared by chemical bath deposition technique. *Physica B: Condensed Matter*, 366 (1-4), 44-54, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2005.05.019>.
- [8] E. Holmelund, J. Schou, S. Tougaard, N. B. Larsen. Pure and Sn-doped ZnO films produced by pulsed laser deposition. *Applied surface science*, 197, 467-471, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(02\)00367-7](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(02)00367-7).
- [9] B. Kadem, H.A. Banimuslem, A. Hassan, Modification of morphological and optical properties of ZnO thin film. *Karbala International Journal of Modern Science*, 3 (2): 103-110, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.kijoms.017.04.003>.
- [10] M. Mekhnache, A. Drici, L.S. Hamideche, H. Benzarouk, A. Amara, L. Cattin, M. Guerioune. Properties of ZnO thin films deposited on (glass, ITO and ZnO: Al) substrates. Superlattices and Microstructures, 49(5), 510-518, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2011.02.002>.

- [11] P. Nunes, B. Fernandes, E. Fortunato, P. Vilarinho, R. Martins. Performances presented by zinc oxide thin films deposited by spray pyrolysis. *Thin Solid Films*, 337 (1-2), 176-179, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(98\)01394-7](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(98)01394-7).
- [12] G. K. Paul, S.K. Sen, Sol-gel preparation, characterization and studies on electrical and thermoelectrical properties of gallium doped zinc oxide films. *Materials letters*, 57 (3), 742-746, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(02\)00865-0](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)00865-0).
- [13] S. T. Shishiyanu, T. S. Shishiyanu, O. I. Lupan. Sensing characteristics of tin-doped ZnO thin films as NO₂ gas sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 107 (1), 379-386, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2004.10.030>.
- [14] M. R. Vaezi, S. K. Sadrnezhad. Improving the electrical conductance of chemically deposited zinc oxide thin films by Sn dopant. *Materials Science and Engineering: B*, 141 (1-2), 23-27, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2007.05.010>.
- [15] D. Bao, H. Gu, A. Kuang. Sol-gel-derived c-axis oriented ZnO thin films. *Thin solid films*, 312 (1-2): 37-39, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(97\)00302-7](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(97)00302-7)
- [16] G. Valle, P. Hammer, S.H. Pulcinelli, C.V. Santilli. Transparent and conductive ZnO: Al thin films prepared by sol-gel dip-coating. *Journal of the European Ceramic Society*, 24 (6): 1009-1013, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(03\)00597-1](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(03)00597-1).
- [17] D. Baydoğan, A.B. Tuğrul. Evaluation of the optical changes for a soda-lime-silicate glass exposed to radiation. *Glass Physics and Chemistry*, 32: 309-314, 2006. <https://doi.org/10.1134/S1087659606030096>
- [18] M. Arif, M. Shkir, S. AlFaify, V. Ganesh, A. Sanger, H. Algarni, A. Singh. A structural, morphological, linear, and nonlinear optical spectroscopic studies of nanostructured Al-doped ZnO thin films: An effect of Al concentrations. *Journal of Materials Research*, 34 (8), 1309-1317, 2019. <https://doi.org/10.1557/jmr.2018.506>.
- [19] M. Thambidurai, J. Y. Kim, C. M. Kang, N. Muthukumarasamy, H. J. Song, J. Song, C. Lee. Enhanced photovoltaic performance of inverted organic solar cells with In-doped ZnO as an electron extraction layer. *Renewable Energy*, 66, 433-442, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.12.031>.





Auction-based distributed task allocation algorithm for drone swarms

Dron sürüleri için müzakere tabanlı dağıtık görev atama algoritması

Mutullah Eşer^{1,*}, Asım Egemen Yılmaz²

^{1,2} Ankara University, Department of Electrical and Electronics Engineering,, 06830, Ankara, Türkiye

Abstract

Drone swarm research has surged due to their superior task performance. This paper introduces Harmony DTA, an auction-based algorithm for task allocation in heterogeneous drone swarms. Prior research primarily focuses on minimizing overall costs associated with assignments. In contrast, Harmony DTA not only minimizes total costs through an enhanced cost calculation function, but also ensures equitable distribution of workload among drones. Additionally, the proposed two-stage auction process reduces the total message size utilized during communication. Simulations and field tests were conducted to assess the effectiveness of the proposed algorithm. In addition, the performance of the algorithm was evaluated by comparing it with the CBBA (Consensus-Based Bundle Algorithm) algorithm in cases where all messages are transmitted between agents and some messages are not transmitted due to communication problems. Based on the simulation findings, the suggested algorithm demonstrates an ability to address the assignment problem with a mean cost reduction of 20% and a mean reduction in message size of 50% compared to CBBA in scenarios without communication issues. However, in situations where communication obstacles lead to some messages being untransmitted between agents, Harmony DTA exhibits inferior performance to CBBA, attributed to conflicting assignments arising from the absence of a consensus phase.

Keywords: Drone swarm, Task allocation, Distributed computing, Auction algorithm

1 Introduction

With advancements in technology, drones have found applications in various fields including military, agriculture, transportation, security, damage assessment, and photography. A drone swarm refers to a network of multiple drones capable of autonomous collaboration to achieve a shared objective. Each individual drone within the swarm is referred to as an agent. The utilization of drone swarms is gaining attention due to their ability to perform tasks more effectively than a single drone, particularly in hazardous military operations [1].

A swarm is typically described as a cohesive assembly collaborating cohesively to accomplish a particular goal or behavior. Similarly, the concept of a drone swarm denotes a

Öz

Dron sürüleri üzerine yapılan araştırmalar, üstün görev performansları nedeniyle ivme kazanmıştır. Bu makale, heterojen drone sürülerinde görev dağılımı için açık artırma dayalı bir algoritma olan Harmony DTA'yı tanıtır. Literatürde var olan araştırmalar öncelikle görevlerle ilgili toplam maliyeti en aza indirmeye odaklanmaktadır. Harmony DTA ise gelişmiş maliyet hesaplama fonksiyonu aracılığıyla yalnızca toplam maliyeti en aza indirmekle kalmaz, aynı zamanda iş yükünün dronlar arasında adil bir şekilde dağıtılmasını da sağlamaktadır. Ayrıca önerilen iki aşamalı açık artırma süreci, iletişim sırasında kullanılan toplam mesaj boyutunu da azaltmaktadır. Önerilen algoritmanın etkinliğini değerlendirmek için simülasyonlar ve saha testleri yapılmıştır. Ek olarak algoritmanın performansı CBBA (Konsensus Tabanlı Demet Algoritması) algoritmasıyla ajanlar arasında tüm mesajların iletilmediği ve haberleşme sorunları nedeniyle bazı mesajların iletilmediği durumlar için de karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçlarına göre önerilen algoritma haberleşme sorunsuz ortamlarda CBBA'ya göre ortalama %20 daha düşük maliyet ve ortalama %50 daha az mesaj boyutu ile atama problemini çözebilmektedir. Haberleşme sorunu nedeniyle ajanlar arasında bazı mesajların iletilmediği ortamlarda ise Harmony DTA, fikir birliği aşamasına sahip olmaması nedeniyle çakışan atamalar yaparak CBBA'ya göre daha kötü performans sergilemektedir.

Anahtar Kelimeler: Dron sürüsü, Görev Atama, Dağıtık hesaplama, Açık artırma algoritması

network composed of numerous drones equipped with communication abilities, autonomous functionality, and aligned towards a common aim.

The agents within the swarm is equipped with sensors, tools, or weaponry tailored to its specific purpose. For instance, combat drones are outfitted with weapons, reconnaissance drones feature advanced sensors for threat detection, among other functionalities. These individual drones can collaborate within the swarm to undertake more complex tasks [2]. The fault tolerance of a drone swarm significantly surpasses that of a single drone, as the failure of one drone does not impede the overall task execution of the swarm. It is anticipated that in the near future, drone swarms

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: eserm@ankara.edu.tr (M. Eser)

Geliş / Recieved: 22.03.2024 Kabul / Accepted: 11.06.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1456928

will supplant conventional unmanned aerial vehicles and other costly weapon systems [3].

The primary factor that impacts the success of a drone swarm in achieving its objectives is the efficiency of intercommunication and information sharing among its individual drones. The main limitation on the scale of a drone swarm is its ability to manage the flow of information effectively [4]. One of the primary drawbacks associated with drone swarms is the inherent difficulty in coordinating them effectively. Many coordination challenges such as task assignment entail solving NP-hard problems, rendering optimal solutions often elusive and exhibiting poor scalability [5].

Task assignment serves as the foundation of a drone swarm's operation. In a swarm system, task assignment essentially involves solving an optimization problem to ensure that tasks of varying positions and significance are effectively carried out by drones possessing diverse positions and capabilities.

Algorithms employed to address the task assignment problem are generally categorized into two main groups: centralized and distributed algorithms.

Centralized task assignment algorithms operate with a central coordinator agent responsible for communicating with all other agents. This coordinating agent facilitates negotiations among the other agents and makes decisions regarding task assignments. Typically, a utility function covering all considered agents is employed in this process. As task assignment occurs centrally, conflicts during assignment are avoided, and there is no need for a consensus stage, enabling the attainment of optimal solutions. However, drawbacks include the vulnerability of the entire system if the coordinator agent becomes damaged. Furthermore, centralized algorithms are better suited for systems with fewer agents due to the high computational costs involved [6].

Distributed task assignment algorithms operate without a coordinator agent, and tasks are distributed among agents through negotiations among themselves. Numerous distributed decision-making algorithms have been developed to address the limitations of centralized decision-making algorithms and mitigate the risk of single-point errors in the system.

Market-based task allocation algorithms exemplify notable instances of distributed algorithms. Auctions form the cornerstone of these algorithms, where agents participate in bidding for tasks, and the highest bidder wins the task.

The task assignment problem, being a combinatorial optimization issue, holds fundamental significance, with any linear optimization problem being potentially linked to it. Consequently, various approaches have been suggested in the literature to address this fundamental problem.

Kuhn's Hungarian algorithm [7], introduced by the Hungarian mathematician Kuhn in 1955, represents the first approach to task assignment. This method, widely employed for solving assignment problems, is characterized by its simplicity and accessibility. In small systems operating within static environments, centralized methods are viable for identifying optimal task assignments. However, as the

number of agents grows and problem complexity escalates, centralized approaches become impractical to scale effectively.

An algorithm for the genetic algorithm-based solution of the task assignment problem is presented in [8]. Given the complexity where some tasks necessitate the involvement of more than one agent for completion, the algorithm accommodates this requirement.

Freitas et al. [9] introduced an algorithm designed for the efficient and decentralized identification and allocation of tasks within UAV swarms. The primary focus of the research is on minimizing message size through the implementation of a low-level protocol for distributed task assignment in multi-UAV networks.

In [10], an auction-based algorithm tailored for task assignment is introduced, accounting for the diverse capacities of heterogeneous agents and the varied requirements of heterogeneous tasks.

Exploration missions in unknown environments, as studied in [11] and [12], involve agents autonomously generating and selling missions through single-item auctions. However, managing rewards for agents necessitates a central decision maker.

Effective bidding rules play a crucial role in achieving near-optimal solutions in task assignment. [13] and [14] specifically focus on devising bidding rules for navigation tasks. Their proposed method entails a multi-round auction process, where each agent bids on its most cost-effective task.

In [15], two distinct greedy-based centralized auction algorithms are introduced for assigning heterogeneous tasks in heterogeneous multi-agent systems. The objective is to distribute tasks in a manner that minimizes energy consumption during task execution, while also considering the maximum completion time for the tasks.

IDMB [16] represents a market-based task assignment algorithm. In this approach, each agent is initially assigned a task with a number identical to its ID. Subsequently, each agent serves as a negotiator for its respective task, while the remaining agents function as bidders for this task.

In [17], two objective functions were delineated to address the MRGAP (Multi-Robot Generalized Assignment Problem), which includes fitness constraints signifying that not all tasks can be assigned to every agent. These objective functions were amalgamated using the weighted sum method. The primary objective function seeks to minimize the sum of squares of the agents workloads, while the secondary objective aims to minimize the total number of agents assigned tasks. A centralized solution approach is employed in this context.

The CBBA (Consensus Based Bundle Algorithm) [18] is a widely utilized market-based multitask sharing algorithm, which is an expanded iteration of the CBAA (Consensus Based Auction Algorithm) designed for addressing the multiple assignment problem. In the CBBA framework, each agent maintains a list of tasks that could potentially be assigned to them. The auction process operates at the task level rather than the package level. CBBA comprises two primary stages: bundle construction and conflict resolution. During the bundle construction phase, each agent constructs

a bundle using a greedy approach and continually updates it throughout the assignment process, adding tasks until the bundle reaches its capacity. In the conflict resolution phase, agents exchange three datasets containing information on the winning agents, winning bids, and bid update time. Following predefined rules, agents update the winning bid and winning agent lists, ensuring consensus among all agents regarding the winning agent for the tasks.

The majority of studies in the literature on task assignment in multi-agent systems accept that there is perfect communication between agents and that the communication channel has unlimited bandwidth [19]. However, in real life, drone swarms operate in environments where bandwidth is limited. Some studies developing algorithms for agent coordination in multi-agent systems under limited bandwidth are listed as follows. Otte and Correll [20], Kassir et al. [21], Guo et al. [22], Kantaros et al. [23], Best et al. [24], Williams et al. [25], Zhou et al. [26], Vander Hook et al. [27], Li et al. [28].

Lately, there has been a surge of interest in drone swarms, leading to increased focus on research into task allocation within unmanned aerial vehicle (UAV) swarms. The ideal task assignment algorithm for drone swarms can vary depending on specific application needs [29], swarm scale, communication capacities, and environmental conditions [30].

Afghah et al. [31] introduced a novel approach to fire surveillance utilizing a group of UAVs. The objective of this system is to offer rapid response times by employing a decentralized leader-follow coalition algorithm, which reduces the number of drones needed and minimizes energy usage while ensuring comprehensive area coverage within an efficient timeframe.

Oberlin et al. [32] and Kim et al. [33] extend the multi-traveling salesmen problem to encompass multi-UAV path planning tailored for reconnaissance and surveillance applications.

Sujit et al. [34] introduce a team-based method enabling UAVs to make decisions autonomously in scenarios where communication among UAVs is unavailable.

Heuristic algorithms have gained traction in drone task allocation. For instance, L. Huo et al. [35] introduced a simulated annealing algorithm with exchange and judgment mechanisms to enhance the generation of feasible adjacent solutions efficiently. Similarly, S. Gao et al. [36] incorporated a negative feedback mechanism into a group algorithm to accelerate convergence and achieve quicker results.

Some recent studies explore task assignment within drone swarms by combining genetic algorithms and neural network logic. This approach is exemplified in studies such as Changliang et al. [37], Song et al. [38], Wang et al. [39].

Creating a truthful combinatorial auction mechanism is inherently challenging due to the multiple private parameters each UAV possesses. Wu et al. [40] addressed this issue by introducing an anti-strategy auction mechanism tailored for spectrum allocation, employing combinatorial auctions.

This study introduces Harmony DTA, an auction-based distributed task assignment algorithm specifically designed

for application in heterogeneous drone swarms. The primary contributions of Harmony DTA include:

- Maximizing the overall system benefit and minimizing task assignment costs through the implementation of a two-stage auction structure.
- Thanks to the developed cost calculation function, it ensures almost equal sharing of the workload among drones.
- Due to the proposed communication protocol, the message sizes transmitted are minimized, consequently reducing the total number of bits utilized for task assignment.
- The effectiveness of most task assignment algorithms in the literature hasn't been scrutinized in settings with communication obstacles. This study's contribution lies in assessing both the suggested algorithm and the CBBA algorithm, prevalent in existing literature, within environments hampered by communication issues.

The structure of this article is as follows: Section II elucidates the task assignment problem and introduces the case studies for task allocation within drone swarms. Section III introduces the proposed distributed decision-making algorithm. Section IV details the simulation results of the proposed algorithm and presents data from performance comparisons with the CBBA algorithm. Section V outlines the conducted field tests. Section VI is the conclusion.

2 Task assignment problem description

This section outlines fundamental definitions pertaining to the task assignment problem within drone swarms, along with the constraints and assumptions associated with it. The drone swarm comprises N drones, each possessing distinct capabilities. Denoted as D , the swarm consists of N heterogeneous drones and can be symbolized as articulated in Equation (1).

$$D = \{1, 2, \dots, N\} \quad (1)$$

The system comprises M tasks, all of which are heterogeneous. Each task requires a drone with the appropriate capability to fulfill it. The set T , representing the collection of M tasks, is denoted as depicted in Equation (2).

$$T = \{1, 2, \dots, M\} \quad (2)$$

The objective is to allocate assignments to drones in a manner that maximizes the overall benefit of the collective group. This scenario is represented through mathematical expression in Equation (3).

$$\max \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x_{ij} R_{ij} \quad (3)$$

If task j is assigned to agent i , then $x_{ij}=1$; otherwise, $x_{ij}=0$. R_{ij} denotes the utility value that agent i will attain if assigned task j . The constraints and assumptions specified for the problem are as follows:

A drone is capable of executing only one task at a time, and its velocity remains constant throughout the duration of the task.

Each task necessitates the assignment of a single drone, as indicated in Equation (4). This condition ensures that the algorithm proposed is devoid of conflicts.

$$\sum_{i=1}^N x_{ij} = 1, j \in T \quad (4)$$

The task initiation must occur within the predefined timeframe as indicated in Equation (5).

$$t_{start_j} \leq t_{d_{ij}} \leq t_{finish_j} \quad (5)$$

where $[t_{start_j}, t_{finish_j}]$ represents the time frame of task j , and $t_{d_{ij}}$ represents the commencement time for agent i to execute task j .

The allocation of tasks to drones should be balanced, aiming to distribute the workload evenly among the drones. This constraint is articulated in Equation (6).

$$|s_i| - |s_k| \leq B, i \neq k \quad (6)$$

where $|s_i|$ is the number of tasks in the task list of drone i , $|s_k|$ is the number of tasks in the task list of drone k , B is the threshold value for the difference in the number of assigned tasks.

2.1 Case studies for UAV task assignment problem

This subsection presents two case studies for investigating the task assignment challenge within drone swarms.

Within the case studies, drones and tasks were randomly dispersed across an area measuring 25×25 meters. The heterogeneous drone swarm consists of two different types of drones: reconnaissance and payload drones. Tasks are categorized into two types: intelligence gathering (IG) and delivery (DL), each with a defined time window. It's imperative that tasks commence within this time period; otherwise, the task cannot be executed. Reconnaissance drones are limited to performing intelligence gathering tasks, whereas payload drones are capable of executing delivery tasks.

Drones possess comprehensive information about the tasks, and the tasks remain static, implying they do not change over time nor are new tasks added. A complete communication structure is established among drones, enabling all drones to communicate with each other effectively.

In the first case study, where algorithm performances are compared, there are 3 drones and 9 tasks. Drone 1 is of reconnaissance type, while Drone 2 and Drone 3 are payload type drones. Tasks 1, 2, 3 and 4 are intelligence gathering type tasks, while Tasks 5, 6, 7, 8 and 9 are delivery type tasks. The drone parameters for the first case study are given in Table 1, and the task parameters are given in Table 2.

In the Table 2, IG denotes the intelligence gathering task type, DL denotes the delivery task type, and t represents the duration of the task.

Table 1. Drone parameters for first case study

Parameter	Value
The number of drones	3
Type of Drone 1	Reconnaissance
Type of Drone 2	Payload
Type of Drone 3	Payload
Initial position of Drone 1	[-0.65,2.80,0]
Initial position of Drone 2	[3.72,6.97,0]
Initial position of Drone 3	[5.76,-6.33,0]

Table 2. Task parameters for first case study

ID	The coordinates of task (x,y,z)	Type	Time window of task validity (s)	t(s)
1	[7.25,5.99,1.07]	IG	[23.90,28.90]	5
2	[-5.28,0.11,1.19]	IG	[69.04,74.04]	5
3	[-2.66,2.05,1.19]	IG	[47.79,52.79]	5
4	[2.38,2.85,1.97]	IG	[99.35,104.35]	5
5	[6.92,4.75,1.95]	DL	[83.26,98.26]	15
6	[-4.35,1.08,0.36]	DL	[10.22,25.22]	15
7	[-2.48,0.16,1.71]	DL	[67.12,82.18]	15
8	[5.21,1.73,1.18]	DL	[20.89,35.89]	15
9	[-2.04,-2.73,0.59]	DL	[49.70,64.70]	15

In the second case study, where algorithm performances are compared, there are 5 drones and 20 tasks. Drone 1 and Drone 2 are reconnaissance type drones, while Drone 3, Drone 4, and Drone 5 are payload type drones. Tasks 1 to 10 are intelligence gathering type tasks, and Tasks 11 to 20 are delivery type tasks. The drone parameters for the second case study are given in Table 3, and the task parameters are given in Table 4.

Table 3. Drone parameters for second case study

Parameter	Value
The number of drones	5
Type of Drone 1	Reconnaissance
Type of Drone 2	Reconnaissance
Type of Drone 3	Payload
Type of Drone 4	Payload
Type of Drone 5	Payload
Initial coordinate of Drone 1	[-0.87,3.73,0]
Initial coordinate of Drone 2	[4.96,9.30,0]
Initial coordinate of Drone 3	[7.69,-8.44,0]
Initial coordinate of Drone 4	[-5.21,9.66,0]
Initial coordinate of Drone 5	[7.99,0.74,0]

Table 4. Task parameters for second case study

ID	The coordinates of task [x,y,z]	Type	Time window of task validity (s)	t(s)
1	[-7.05,0.15,1.19]	IG	[69.04,74.04]	5
2	[-3.55,2.74,1.19]	IG	[47.79,52.79]	5
3	[3.18, 3.80, 1.97]	IG	[99.35,104.35]	5
4	[9.22, 6.33, 1.95]	IG	[83.26,88.26]	5
5	[-5.80,1.44,0.36]	IG	[10.22,15.22]	5
6	[-3.30,0.21,1.72]	IG	[67.12,72.12]	5
7	[6.95,2.31,1.18]	IG	[20.89,25.89]	5
8	[-2.72,-3.65,0.59]	IG	[49.70,54.70]	5
9	[1.60,-8.82,0.65]	IG	[15.12,20.12]	5
10	[3.74,6.80,0.63]	IG	[45.50,50.50]	5
11	[6.47,-3.67,1.86]	DL	[66.45,81.45]	15
12	[-9.19,-8.67,1.85]	DL	[86.77,101.77]	15
13	[-7.84,-4.44,0.43]	DL	[14.88,29.88]	15
14	[-7.15,2.30,0.76]	DL	[75.51,90.51]	15
15	[-9.56,3.09,1.39]	DL	[9.90,24.90]	15
16	[-2.23,1.78,1.13]	DL	[81.27,96.27]	15
17	[-8.90,-5.10,1.75]	DL	[33.27,48.27]	15
18	[-7.89,6.74,0.03]	DL	[92.49,107.49]	15
19	[8.49,1.13,0.02]	DL	[72.48,87.48]	15
20	[-6.96,5.81,0.30]	DL	[90.87,105.87]	15

3 Harmony Drone Task Allocation (DTA) algorithm

The Harmony DTA algorithm is an auction-based approach for dynamic task assignment within heterogeneous drone swarms.

The concept behind Harmony DTA draws from the management principle applied to large-scale projects, emphasizing the potential synergy between closely interrelated tasks within such projects. It suggests that by strategically designing or executing one task, it can positively influence the outcomes or processes of another, thus maximizing overall efficiency. In line with this principle, Harmony DTA offers a method to enhance the overall system benefits by leveraging the synergy between associated tasks, rather than assigning tasks individually to agents in each iteration.

The Harmony approach employs a two-stage auction process. Notably, the algorithm's auction mechanism consists of two distinct stages. Here, agents aim not only to win the task offering the highest individual benefit but also strive to acquire the task providing the second-highest benefit, commonly referred to as the synergy task. This dual-stage process distinguishes Harmony from existing task assignment algorithms found in the literature, where typically one stage involves an auction while the other entails reaching a consensus.

An example scenario where the proposed algorithm can be applied is shown in Figure 1. Here, there are 12 tasks categorized into 4 different types, alongside a total of 7 drones, each belonging to one of 3 distinct types. Notably, the scout drone's role revolves around patrolling to identify

new tasks; upon detection, it relays this information to other drones without executing tasks itself. At time t_0 , a predefined list of tasks necessitates assignment, with the potential for new tasks to emerge dynamically from either the Ground Control Unit (GCU) or the Scout drone. Drones of type 1 are capable of executing tasks categorized as types 1 and 2, whereas type 2 drones are suited for tasks classified as types 3 and 4. Each task is associated with a defined timeframe and duration for completion. Additionally, should a drone's charge level fall below a critical threshold, it must promptly return to the nearest GCU for recharging.

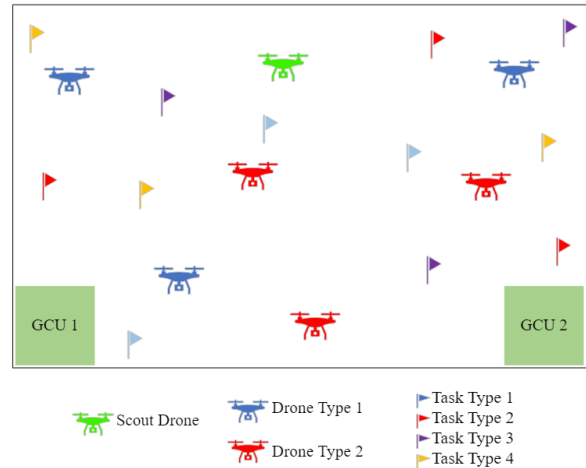


Figure 1. Sample scenario

Harmony DTA comprises three main modules: States and Modes, Logic, and CLAW. These modules are illustrated in Figure 2.

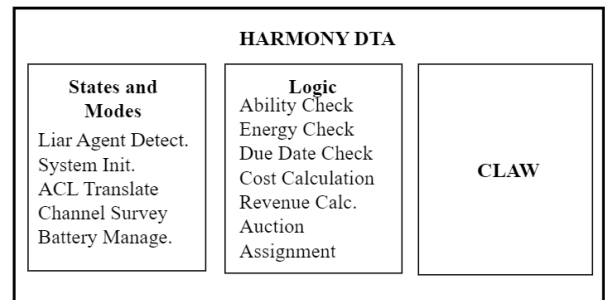


Figure 2. Modules of Harmony DTA

The States and Modes submodule is responsible for several tasks including detecting traitor agents, interpreting received messages and directing them to relevant subsystems, managing communication links, and monitoring drone battery levels. In essence, this submodule handles fundamental level controls for both individual agents and the entire swarm.

The Logic module acts as the central component where the task assignment algorithm functions. This section carries out various functions, including cost and reward calculations, auction processes, and task assignments. Task assignment takes place within the Logic module, utilizing a two-stage

auction process called pre-auction and synergy-auction. This iterative process continues until all tasks are assigned.

Within the CLAW module, essential control loops and route planning operations are executed to enable the drone to fulfill its assigned task effectively.

In this study, the evaluation of the proposed algorithm's assignment performance was limited to static tasks, and detailed discussions on all its modules were not included within the scope of the study.

Table 5 presents the message package structure and corresponding values utilized by Harmony DTA for agent communication language.

Table 5. Message package structure

Agent Message Package Structure	
Package	Description
Receiving Address (8 Bit)	Specifies the receiving agent ID number. For broadcast messages, this value is "0xFF".
Sender Address (8 Bit)	Specifies the ID number of the agent sending the message. The address of the central computer sharing the tasks is "0x00".
Message Type (8 Bit)	Indicates the type of message sent. This field can take up to 8 different values. 0x01: Sharing task locations 0x02: Pre-Auction 0x04: Pre-Auction Result 0x08: Bidding 0x10: Synergy-Auction Result 0x20: Dron Trust Calculation 0x04: Task completion notification 0x80: Ping message
Task Number (8 Bit)	Indicates the number of the task.
MaxReward (32 Bit)	Indicates the reward value of the best task.
MaxTaskInc (32 Bit)	Indicates the δ value.
SynergyTaskInc (32 Bit)	Indicates the γ value.
Auction (1 Bit)	Indicates that the agent is in the process of auction for the task.
longitude (64 Bit)	Longitude value of location information from GPS.
Latitude (64 Bit)	Latitude value of location information from GPS.
Agent Number (8 Bit)	It is the area where the ID numbers of the relevant agent are kept in the message packets of the traitor and disabled agents.
Time Information (64 Bit)	It is the field that is sent periodically to measure the quality of the communication channel and indicates the time elapsed since the start of the task.

3.1 Cost function design

The cost function is used to calculate the task costs of the drone, it consists of two components: balance cost and distance cost. The cost of task j for agent i , denoted as C_{ij} , is computed using Equation (7). w_1 and w_2 are the distance and balance cost coefficients, respectively.

$$C_{ij} = w_1 C_{ij}^D + w_2 C_{ij}^B \quad (7)$$

The balance cost (C_{ij}^B) for drone i performing task j is determined using Equation (8), which takes into account the task load of the drone.

$$C_{ij}^B = \frac{|b_i|}{MT_i} \quad (8)$$

where $|b_i|$ represents the number of elements in the task list of drone i and MT_i denotes the maximum number of tasks that drone i can add to its task list.

The distance cost (C_{ij}^D) of drone i for task j is determined by Equation (9), which considers the distance of the drone to the task location.

$$C_{ij}^D = \frac{d_{ij}}{MFD_i} \quad (9)$$

where MFD_i represents the distance of drone i to the farthest task, while d_{ij} denotes the distance between drone i and task j . The cost matrix for agent i is expressed as depicted in Equation (10).

$$C_i = [C_{i1} \quad C_{i2} \quad \dots \quad C_{iM}] \quad (10)$$

Employing the defined cost function, the local utility value is computed according to Equation (11), where R_{ij} represents the utility value for agent i of task j .

$$R_{ij} = V_j e^{-\tau * (tc_{start} - (tp_{start} + tp_{duration}))} - C_{ij} \quad (11)$$

In this context, V_j represents the initial reward value of task j , while τ denotes the time penalty coefficient. Additionally, tc_{start} refers to the earliest time at which agent i is able to commence task j , tp_{start} represents the time required for the agent to initiate the last task on the agent's path, and $tp_{duration}$ signifies the duration of the last task on the agent's path.

Two different reward matrices are utilized in the algorithm: normal (R_{ij}^N) and synergy (R_{ij}^S). The normal reward matrix is computed using the cost matrix acquired by the agent in the respective iteration for tasks that have not yet been assigned.

In the calculation of the synergy reward matrix, the initial step involves the computation of a new synergy cost matrix, which is based on the assumption that the agent successfully completes the task with the highest reward in the normal reward matrix. Subsequently, the synergy reward matrix is determined based on this cost matrix using Equation (11). The utilization of the synergy income matrix aims to capture the synergy between tasks, particularly their proximity to one another. This approach facilitates the agent in receiving their next assignment with maximum income by leveraging task synergies.

3.2 Pre-auction phase

The first stage of the Harmony DTA algorithm. During this stage, the drone conducts an initial check to determine if its task list has reached maximum capacity. If the task list is

already full, the drone is excluded from the auction and subsequent task assignment processes. If there is available space for a new task in the task list, the drone identifies the highest value (f_i) task (j_i) in the normal reward matrix and computes its bid (δ_i) for f_i . Subsequently, the drone broadcasts an auction message for task j_i . The calculation of δ_i is determined by Equation (12), where s_i represents the utility value of the agent's second-best task.

$$\begin{aligned} \delta_i &= f_i - s_i \\ j_i &= \arg \max_{j=1, \dots, n} \{R_{ij}^N\} \\ f_i &= \max_j \{R_{ij}^N\} \\ s_i &= \max_{j \neq j_i} \{R_{ij}^N\} \end{aligned} \quad (12)$$

After receiving auction messages from all agents, the drone checks whether other drones have initiated an auction for the same task. If multiple drones have started an auction for a task, the drone with the highest reward value wins the task. In cases where income values are equal, the drone with the smaller ID wins the task. This process is referred to as the pre-auction. The winning drone announces its success to other agents in the swarm with a Pre-Auction Result message.

The winning drone in the pre-auction can also bid for the synergy task in the second stage. The drone that loses the preliminary auction cannot bid on the synergy task either.

3.3 Synergy-auction phase

This stage involves making bids for synergy tasks. If an agent wins a task during the pre-auction phase, synergy task bids are extended for synergy task during the synergy-auction phase. If the drone receives a Pre-Auction Result message from another drone regarding the task with the highest value in the synergy revenue matrix, it then forwards its bid for the relevant task to the winning drone. When computing the bid for the synergy task, the drone determines it using the synergy revenue matrix, as outlined in Equation (13).

$$\begin{aligned} \gamma_i &= g_i - h_i \\ j_i &= \arg \max_{j=1, \dots, n} \{R_{ij}^S\} \\ g_i &= \max_j \{R_{ij}^S\} \\ h_i &= \max_{j \neq j_i} \{R_{ij}^S\} \end{aligned} \quad (13)$$

Upon receiving offer messages for synergy tasks, the agents winning the respective tasks are identified for the initial iteration. If $\delta_i > \gamma_i$ for the relevant task, the agent who broadcasts the auction message wins the task. Conversely, if a synergy offer results in $\gamma_i > \delta_i$, the agent making the offer wins the task. Should the agent who initiated an auction for the most valuable task receive no bids, they emerge as the winner.

At the conclusion of the synergy-auction phase, all agents announce the tasks they have won using the Synergy-Auction Result message. Agents unable to win a task set the task ID to 0 and broadcast the message accordingly. Agents receiving the message then remove the corresponding task from the unassigned task list. This measure helps prevent

disagreements between agents and maintains an accurate record of unassigned tasks.

4 Simulation experiments

In this section, simulation studies to evaluate the performance of Harmony DTA are presented first. Additionally, to compare the algorithm's performance with existing approaches, the CBBA algorithm proposed by Choi et al. [18] was also implemented, and the performance comparison results obtained were subsequently shared.

The primary rationale behind selecting the CBBA algorithm for comparison with the proposed algorithm is its auction-based nature, which mirrors that of the proposed algorithm. This characteristic lends itself well to heterogeneous drone swarms operating in dynamic environments, making CBBA a suitable benchmark. Furthermore, the authors' familiarity and expertise with CBBA reinforced this decision. CBBA is recognized for its effectiveness in mitigating and streamlining the complexity of contemporary challenges, and its widespread use in various applications, including coordination and task allocation within UAV swarms, underscores its relevance and applicability.

Numerous studies have investigated the effectiveness and efficiency of traditional CBBA and its enhanced iterations within the realm of drone swarms. This prevalence of research served as a key motivation for evaluating the proposed algorithm against CBBA. Chen et al. [41] present a variation of CBBA known as CBBA with local replanning (CBBA-LR), designed to swiftly generate dependable task replanning solutions in response to new tasks. CBBA-LR employs a capable matrix to signify the capable relationship between UAVs and tasks, ensuring that only capable UAVs for the new task are incorporated in the task replanning process. Choi et al. [42] propose an extension to the Consensus Based Bundle Algorithm (CBBA) in two notable ways. Firstly, CBBA has been enhanced to enable safe routing of UAVs around ground environment obstacles. Secondly, CBBA now addresses the issue of churning in UAV flight paths caused by uncertainty in target situational awareness. [43-45] have refined the traditional CBBA algorithm, focusing particularly on enhancing task bundle construction methodologies. [46, 47] have enhanced the classical CBBA algorithm by addressing various aspects such as information interaction modes, efficiency, and task types. [48, 49] have advanced the classical CBBA algorithm by concentrating on enhancing its structural framework. Yan et al. [50] propose three enhancements to the classic CBBA algorithm. Firstly, they augment the information exchange between humans and machines. Secondly, they integrate task time windows to cater to the demands of close combat scenarios. Thirdly, they introduce task-time indicators to prioritize tasks that are geographically closer to the UAVs themselves.

In simulation and field tests, $w_1 = 0.7$, $w_2 = 0.3$ and $\tau = 0.1$. These constants can be changed by the user depending on the task and swarm type.

Matlab software was used for simulations. The personal computer utilized for these simulations features a 2.53GHz

Intel processor, 12GB of memory, and operates on the Windows 10 operating system.

4.1 Assignment results for case studies

The drone routes resulting from the assignment of 9 tasks to 3 drones using Harmony DTA for the first case study, as outlined in the third section, are illustrated in Figure 3. Within the figure, the x and y axes denote the longitudinal and lateral positions of the aircraft, respectively, while the z axis signifies the time constraints linked to the tasks.

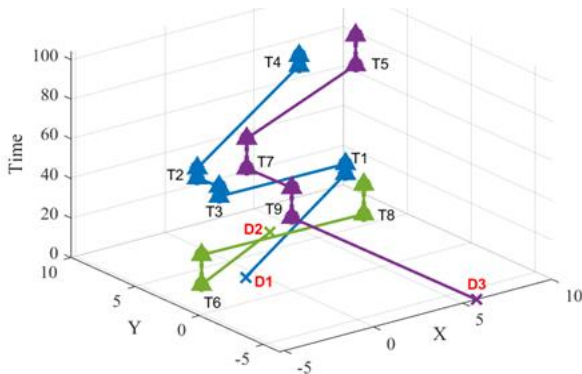


Figure 3. Agent routes for first case study

As illustrated in Figure 3, Harmony DTA has effectively completed the task assignment process for the defined scenario without encountering any conflicts. Tasks were assigned to appropriate drones based on their types and time frames and were integrated into their paths. Specifically, drone 1 will execute tasks 1, 3, 2, and 4 sequentially, drone 2 will execute tasks 6 and 8, and drone 3 will undertake tasks 9, 7, and 5 respectively.

The drone routes resulting from the assignment of 20 tasks to 5 drones using Harmony DTA for the second case study, as outlined in the third section, are illustrated in Figure 4. Drone 1 will execute tasks 5, 9, 7, and 8 sequentially, drone 2 will execute tasks 10, 2, 6, 1, 4 and 3 sequentially, drone 3 will execute tasks 11 and 20 respectively, drone 4 will execute tasks 15, 13, 17, 14, 16 and 18 respectively, drone 5 will execute tasks 19 and 12 respectively.

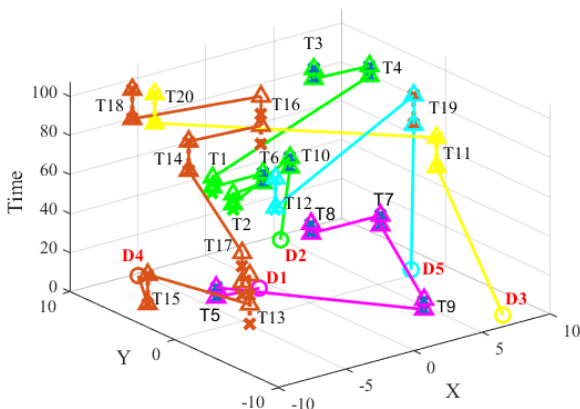


Figure 4. Agent routes for second case study

4.2 Comparison with CBBA

The results and comparisons regarding the assignments obtained with Harmony DTA and CBBA for the first case study are provided in Table 6 and Table 7. In the comparison result tables, total travel distance represents the cumulative distance travelled by all agents upon completion of the assignment. Total message number indicates the overall count of messages exchanged between agents during problem-solving. Number of unassigned tasks signifies the quantity of tasks that the algorithm fails to assign to any agent. Total message size corresponds to the aggregate size, in bits, of all messages transmitted between agents during the problem-solving process. In the assignment result tables, "Harmony DTA path" denotes the route formulated for the respective agent when a task is assigned using Harmony, while "CBBA path" signifies the route devised for the relevant agent when a task is assigned using CBBA. "Harmony travel distance" represents the distance in meters that the relevant agent will traverse when a task is assigned using Harmony, while "CBBA travel distance" indicates the distance in meters that the relevant agent will cover when task assignment is made using CBBA.

Table 6. Comparison results of case study 1

Method	Total Travel Distance (m)	Total Message Number	Number of unassigned tasks	Total message size (bit)
Harmony	16.35	27	0	585
CBBA	17.11	15	1	6600

Table 7. Assignment results of case study 1

Agent ID	Harmony DTA Path	Harmony Travel Dist. (m)	CBBA Path	CBBA Travel Dist.(m)
1	1,3,2,4	7,70	1,3,2	7,70
2	6,8	4,03	6,5,4	9,41
3	9,7,5	4,61	9,7	0

In the first case study, Harmony DTA successfully solved the assignment problem with a lower total cost compared to CBBA. Furthermore, while CBBA failed to assign a task to any agent, Harmony DTA appropriately assigned all tasks to drones. In CBBA, agents employ a greedy strategy to form a route in each cycle, appending the task that yields the highest benefit to the route. However, this approach may result in the failure to assign certain tasks, as evidenced by the unassigned task in case study 1. Conversely, Harmony DTA achieves full task assignment by considering synergies, such as proximity relations among tasks, facilitated by its two-stage auction process. When comparing the total message sizes, the CBBA algorithm requires larger message sizes due to its necessity for all agents to share the y, z, and s vectors in the conflict resolution phase, resulting in a solution using 6600 bits. In contrast, Harmony DTA, thanks to its two-stage auction mechanism, achieved much smaller message sizes, solving the problem with only 585 bits. Although the total

number of messages transmitted between drones to solve the problem is higher for Harmony DTA due to its two-stage auction process.

The results and comparisons regarding the assignments obtained with Harmony DTA and CBBA for the second case study are provided in Table 8 and Table 9.

Table 8. Comparison results of case study 2

Method	Total Travel Dist.(m)	Total Message Number	Number of unassigned tasks	Total message size (bit)
Harmony	50.39	103	0	2273
CBBA	53.79	40	1	57920

Table 9. Assignment results of case study 2

Agent ID	Harmony DTA Path	Harmony Travel Dist.(m)	CBBA Path	CBBA Travel Dist.(m)
1	5,9,7,8	12.58	5,7,2,6,3	9.76
2	10,2,6,1,4,3	11.32	9,10,8,1,4	21.93
3	11,20	7.27	13,17,11,12	12.59
4	15,13,17,14,16,18	13.46	15,14,18	5.46
5	19,12	5.74	19,20	4.03

In second case study, Harmony DTA outperforms CBBA in task assignment, achieving lower total travel distance and message size thanks to the proposed message structure and two-stage auction process. In addition, similar to the first case study, CBBA could not assign a task to any agent due to its greedy approach.

In order to express the contribution of the proposed algorithm more clearly, in the subsequent phase of simulations, the performances of the proposed algorithm, as well as the CBBA algorithm, were evaluated through Monte Carlo simulations. The objective was to allocate 20 tasks to 20 aircraft within a fully connected network structure, assuming no communication issues. Comparative analysis among the algorithms encompassed total mission cost (measured in meters) and total message size (measured in bits) parameters. Monte Carlo simulations were executed across 100 different scenarios, with aircraft and mission locations being randomly generated for each scenario.

The total task cost cumulative probability density function (CDF) graph is provided in Figure 5. Total mission cost represents the collective distance traveled by each aircraft. The total task cost achieved by the proposed algorithm, due to its two-stage auction structure, outperforms CBBA.

The CDF graph in Figure 6 illustrates the total number of bits, signifying the overall size of messages transmitted during task assignment. This comparison enables us to assess the efficiency of various methods in terms of resource utilization. By quantifying the amount of data exchanged throughout the task assignment process, we can gain insights into the feasibility and scalability of implementing the proposed algorithm in real-world communication networks

with limited bandwidth. As depicted in the figure, the proposed algorithm demonstrates the capability to address the problem with significantly smaller message sizes, attributed to the developed cost function, auction structure, and message format enhancements.

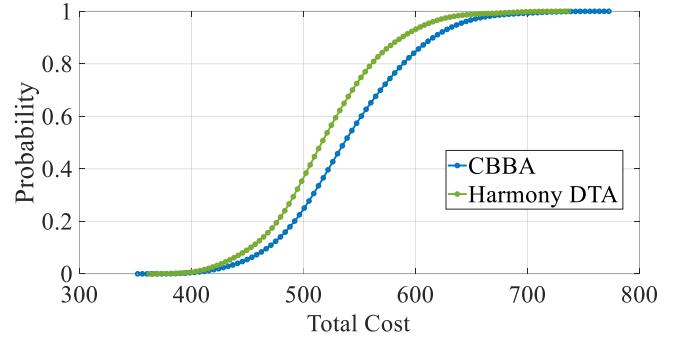


Figure 5. CDF of the total mission cost

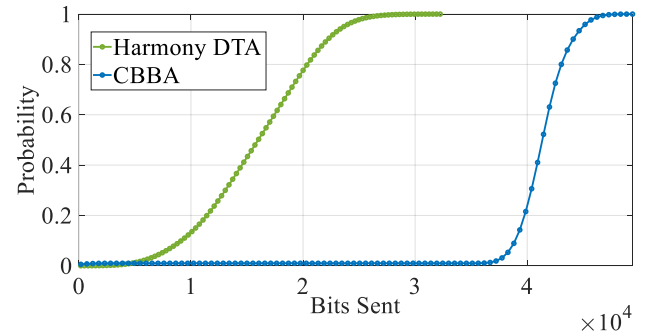


Figure 6. CDF graph of total bits sent

4.3 Comparison with CBBA under limited communication

In this section, the proposed algorithm is evaluated against the CBBA under the scenario where some messages may not be transmitted, employing the Bernoulli communication model. Simulations were conducted with varying probabilities of message non-transmission (0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%), and the algorithms were compared based on the number of unassigned tasks and conflicting tasks parameters.

Figure 7 displays the outcomes of simulating the allocation of 10 tasks among 5 agents under conditions of limited communication. In CBBA, there is no notable change in the number of unassigned tasks even with heightened probabilities of communication error. Moreover, due to its consensus-based assignment approach, the fluctuation in the number of conflict tasks remains minimal even with elevated error rates. Although the proposed algorithm maintains a steady count of unassigned tasks within acceptable limits despite heightened communication error rates, its absence of a consensus stage results in an increase in conflict task assignments as the probability of communication errors rises.

When communication issues arise and messages fail to transmit, the harmony DTA faces challenges. Even if the proposed algorithm manages to assign all tasks under such circumstances, conflicts may arise due to the absence of a

consensus stage. As the probability of communication errors increases, the incidence of conflict assignments also rises.

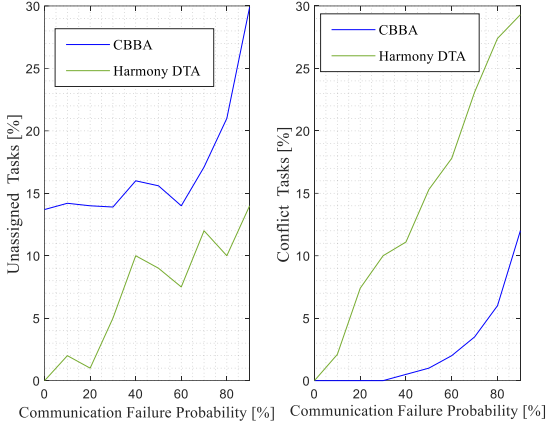


Figure 7. Assigning 10 tasks to 5 agents under limited communication

5 Field experiments

To demonstrate the practical applicability of Harmony DTA in real-world scenarios, the algorithm was implemented on a swarm of two drones, and field tests were conducted at Ankara University Campus on 15.12.2023.

The drones utilized for the field tests are the Ryze Tello models produced by DJI. A custom hardware setup has been designed for the drones to acquire location information and facilitate communication between them. This hardware primarily comprises a LoRa module, a GPS module, and a microcontroller. The developed system architecture is illustrated in Figure 8.

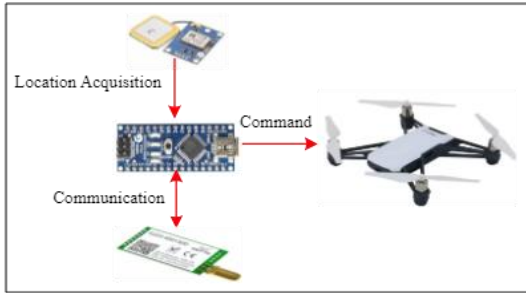


Figure 8. System architecture

A photo of the drone swarm used in field tests is given in Figure 9.



Figure 9. Equipment used in the field experiment

In the field test scenario, two heterogeneous drones and three tasks were defined. The location and other parameters of the drones and tasks are provided in Table 10 and Table 11, respectively. The tasks were transmitted to the drones by the ground station, with a laptop serving as the ground station. Messages exchanged between the agents were monitored and recorded by the ground station to validate that the algorithm was functioning correctly.

Table 10. Drone parameters used in field tests

Drone ID	The coordinates of drone [x,y,z]	Drone Type
1	39.9628,32.78125	Reconnaissance
2	39.96235,32.78115	Payload
GS	39.96235,32.781414	Ground Station

Table 11. Task parameters used in field tests

Task No	The coordinates of task [x,y,z]	Type	Window of task validity	t (s)
1	39.96265,32.78115	IG	[25.00,31.00]	5
2	39.96269,32.78189	IG	[34.00,40.00]	5
3	39.9623,32.781	PL	[10.00,20.00]	15

In the field tests, tasks were efficiently distributed among the drones using Harmony DTA. Drone 1 was assigned routes for Tasks 1 and 2, while Drone 2 was designated routes for Task 3. The satellite image of the movement of drones is given in Figure 10.

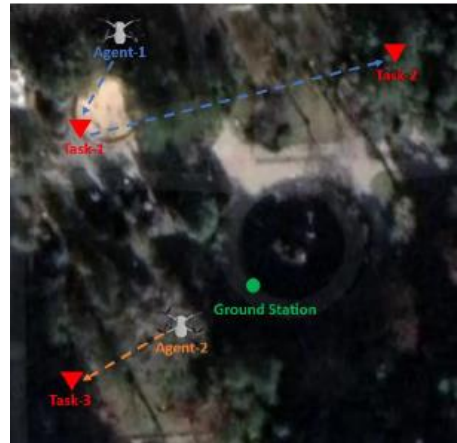


Figure 10. Satellite image for field test

The field tests have concluded successfully, demonstrating the applicability of the proposed algorithm in real-world scenarios. This confirms the efficacy observed during simulation.

6 Conclusion

This study proposed the auction-based Harmony DTA algorithm developed for distributed task assignment in drone swarms. The findings underscore the superiority of the proposed algorithm in resolving assignment quandaries with reduced costs compared to CBBA, particularly evident in communication-unfettered environments. Furthermore,

owing to its innovative two-stage auction mechanism and streamlined message structure, the algorithm achieves problem resolution with minimal bit utilization, offering a distinct advantage in bandwidth-constrained settings. In environments conducive to reliable message transmission, the proposed algorithm exhibits superior performance. However, challenges emerge when communication issues disrupt message transmission, potentially leading to conflicts even if all tasks are successfully assigned. This underscores the necessity for a consensus stage, particularly in scenarios with heightened probabilities of communication errors.

Future investigations will incorporate a consensus stage to bolster the algorithm's performance under limited communication conditions. Following this augmentation, the algorithm's resilience in communication-constrained environments will be evaluated across diverse communication network topologies.

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 7%

References

- [1] J. Laarni, A. Vaatanen, H. Karvonen, Development of a concept of operations for a counter-swarm scenario. International Conference on Human-Computer Interaction, pp. 49-63, June 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06086-1_4
- [2] T. Zielinski, Factors determining a drone swarm employment in military operations, Centrum Rzecznawstwa Budowlanego Sp. z o.o., 1, pp. 59-71, 2021.
- [3] R. B. Yeşilay, A. Macit, Dünyada ve Türkiye’de drone ekonomisi: geleceğe yönelik beklentiler. Beykoz Akademi Dergisi, 8, 239-251, 2020. <https://doi.org/10.14514/byk.m.26515393.2020.8/1.239-251>
- [4] Z. Kallenborn, InfoSwarms: drone swarms and information warfare. The US Army War College Quarterly: Parameters, 52, 87-102, 2022.
- [5] R. M. Zlot, An auction-based approach to complex task allocation for multirobot teams. Ph.D. Thesis, Carnegie Mellon University, Pennsylvania, 2006.
- [6] G. M. Skaltsis, H. S. Shin, A. Tsourdos. A survey of task allocation techniques in MAS, International Conference on Unmanned Aircraft Systems, pp. 488-497, 2022.
- [7] H. W. Kuhn, The Hungarian method for the assignment problem, Naval Research Logistics, 2(1), 83-97, March 1955.
- [8] T. Shima, S. J. Rasmussen, UAV cooperative multiple task assignments using genetic algorithms, American Control Conference, June 2005.
- [9] E. P. de Freitas, M. Basso, A. A. S. da Silva, M. R. Vizzotto, M. S. C. Correa, A distributed task allocation protocol for cooperative multi UAV search and rescue systems. International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), June 2021.
- [10] X. Tao, Y. Zheng, Multi agent task allocation method based on auction. Advances in Wireless Networks and Information Systems, 72, 217-225, 2010. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14350-2_27
- [11] M. B. Dias and A. Stentz, A free market architecture for distributed control of a multirobot system. Conf. on Intelligent Autonomous Systems, pp. 115–122, Venice, Italy, July 2000.
- [12] R. M. Zlot, A. T. Stentz, M. B. Dias, S. Thayer, Multi-robot exploration controlled by a market economy. Proc. Int’l Conf. on Robotics and Automation, May 2002.
- [13] C. Tovey, M. Lagoudakis, S. Jain, S. Koenig, The generation of bidding rules for auction-based robot coordination, Multi-Robot Systems Workshop, Mar. 2005.
- [14] M. G. Lagoudakis, E. Markakis, D. Kempe, P. Keskinocak, A. Kleywegt, S. Koenig, C. Tovey, A. Meyerson, S. Jain, Auction-based multi-robot routing. Robotics: Science and Systems, Cambridge, USA, June 2005. <https://doi.org/10.15607/RSS.2005.I.045>
- [15] M. Rinaldi, S. Primatesta, Auction based task allocation for safe and energy efficient UAS parcel transportation. 11th International Conference on Air Transport, pp. 60-69, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.11.008>
- [16] S. Trigui, A. Kouba, A distributed market based algorithm for the multi robot assignment problem. 3rd International Workshop on Cooperative Robots and Sensor Networks, pp. 1108-1114, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.05.540>
- [17] K. Erten, T. Saraç, Simulated annealing algorithm for the multi resource generalized assignment problem with eligibility constraint. Gazi University Journal of Science, 9(3), 385-401, 2021. <https://doi.org/10.29109/gujsc.919665>
- [18] H. L. Choi, L. Brunet, Consensus based decentralized auctions for robust task allocation. IEEE Transactions On Robotics, 25(4), 912-926, 2009. <https://doi.org/10.1109/TRO.2009.2022423>
- [19] Z. Yan, N. Jouandeau, A. A. Cherif, A survey and analysis of multi-robot coordination. International Journal of Advanced Robotic Systems, 10(12), 399, 2013. <https://doi.org/10.5772/57313>
- [20] M. Otte, N. Correll, Any-com multi-robot path-planning: Maximizing collaboration for variable bandwidth. Distributed Autonomous Robotic Systems, 83, 161–173, 2013. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32723-0_12
- [21] A. Kassir, R. Fitch, A. Sukkarieh, Communication-efficient motion coordination and data fusion in information gathering teams. 2016 IEEE/RISJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 5258–5265, 2016. <https://doi.org/10.1109/IROS.2016.7759773>
- [22] M. Guo, M. M. Zavlanos, Multirobot data gathering under buffer constraints and intermittent communication. IEEE Transactions on Robotics, 34(4),

- 1082–1097, 2018. <https://doi.org/10.1109/TRO.2018.2830370>
- [23] Y. Kantaros, M. Thanou, A. Tzes, Distributed coverage control for concave areas by a heterogeneous robot-swarm with visibility sensing constraints. *Automatica*, 53, 195–207, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2014.12.034>
- [24] G. Best, M. Forrai, R. R. Mettu, R. Fitch, Planning-aware communication for decentralised multi-robot coordination. 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Brisbane, Australia, , pp.1050-1057, 2018. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8460617>
- [25] R. K. Williams, A. Gasparri, G. S. Sukhatme, G. Ulivi, Global connectivity control for spatially interacting multi-robot systems with unicycle kinematics. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 1255– 1261, 2015. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7139352>
- [26] L. Zhou, P. Tokekar, Active target tracking with self-triggered communications in multi-robot teams. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 16(3), 1085-1096, 2019. <https://doi.org/10.1109/TASE.2018.2867189>
- [27] J. V. Hook, P. Tokekar, V. Isler, Algorithms for cooperative active localization of static targets with mobile bearing sensors under communication constraints. *IEEE Transactions on Robotics*, 31(4), 864–876, 2015. <https://doi.org/10.1109/TRO.2015.2432612>
- [28] H. Li, G. Chen, T. Huang, Z. Dong, High-performance consensus control in networked systems with limited bandwidth communication and time-varying directed topologies. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 28(5), 1043– 1054, 2017. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2016.2519894>
- [29] S. Yan, F. Pan, D. Zhang, X. Jihua Research on task reassignment method of heterogeneous UAV in dynamic environment. 6th International Conference on Robotics and Automation Sciences, 2022. <https://doi.org/10.1109/ICRAS55217.2022.9841995>
- [30] X.L. Zhao, K.W. Zhang, Z.Z. Li, Research on dynamic reconnaissance resource allocation of multiple UAVs. *Electronics Optics and Control*, 27(6), 11–15, 2020.
- [31] F. Afghah, A. Razi, J. Chakareski, and J. Ashdown, Wildfire monitoring in remote areas using autonomous unmanned aerial vehicles. *IEEE Conf. Comput. Commun. Workshops*, pp. 835–840, 2019. <https://doi.org/10.1109/INFCOMW.2019.8845309>
- [32] P. Oberlin, S. Rathinam, and S. Darbha, A transformation for a heterogeneous, multiple depot, multiple traveling salesman problem. *IEEE Amer. Control Conf.*, pp. 1292–1297, 2009. <http://dx.doi.org/10.1109/ACC.2009.5160666>
- [33] D. Kim, L. Xue, D. Li, Y. Zhu, W. Wang, and A. O. Tokuta, On theoretical trajectory planning of multiple drones to minimize latency in search-and-reconnaissance operations. *IEEE Trans. Mobile Comput.*, 16 (11), pp. 3156–3166, 2017.
- [34] P.B. Sujit, A. Sinha, and D. Ghose, Multi-UAV task allocation using team theory. *IEEE Conference on Decision and Control*, 2005. <https://doi.org/10.1109/CDC.2005.1582370>
- [35] L. Huo, J. Zhu, G. Wu, and Z. Li, A novel simulated annealing based strategy for balanced uav task assignment and path planning. *Sensors*, 20(17), 4769, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20174769>
- [36] S. Gao, J. Wu, and J. Ai, Multi-uav reconnaissance task allocation for heterogeneous targets using grouping ant colony optimization algorithm. *Soft Computing*, 25(10), pp.7155–7167, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00500-021-05675-8>
- [37] C. Yu, W. Du, F. Ren, and N. Zhao, Deep reinforcement learning for task allocation in uav-enabled mobile edge computing. *International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems*, pp 225–232, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-84910-8_24
- [38] S. Ma, W. Guo, R. Song, and Y. Liu, Unsupervised learning based coordinated multi-task allocation for unmanned surface vehicles. *Neurocomputing*, 420, pp. 227–245, 2021.
- [39] Z. Wang, L. Liu, T. Long , and Y. Wen, Multi-uav reconnaissance task allocation for heterogeneous targets using an oppositionbased genetic algorithm with double-chromosome encoding. *Chinese Journal of Aeronautics*, 31(2) ,pp.339–350, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2017.09.005>
- [40] F. Wu, T. Zhang, C. Qiao, and G. Chen, A strategy-proof auction mechanism for adaptive-width channel allocation in wireless networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(10), pp. 2678-2689, 2016. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2016.2605939>
- [41] J. Chen, X. Qing, F. Ye, K. Xiao, K. You, Q. Sun, Consensus-based bundle algorithm with local replanning for heterogeneous multi-UAV system in the time-sensitive and dynamic environment. *Journal of Supercomput*, **78**, pp. 1712–1740, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11227-021-03940-z>
- [42] L. F. Bertuccelli, H. Choi, P. Cho, J. P. How, Real-time multi-uav task assignment in dynamic and uncertain environments. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 2009.
- [43] A. Samiei, S. Ismail, L. Sun, Cluster-based hungarian approach to task allocation for unmanned aerial vehicles. *NAECON 2019 - IEEE National Aerospace and Electronics Conference*, 2019.
- [44] T. Long, H. Y. Zhu, L. C. Shen, Negotiation-based distributed task allocation for cooperative multiple unmanned combat aerial vehicles. *Journal of Astronautics*, 27(3), pp. 457–462, 2006.
- [45] M. Yao, X. Z. Wang, M. Zhao, Cooperative combat task assignment optimization design for unmanned aerial vehicles cluster. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2013.
- [46] L. B. Johnson, S. S. Ponda, H. L. Choi, J. P. How, Improving the efficiency of a decentralized tasking

- algorithm for UAV teams with asynchronous communications. Aiaa Guidance, Navigation, Control Conference, 2010.
- [47] X. Fu, J. Pan, X. Gao, B. Li, K. Zhang, Task allocation method for multi-uav teams with limited communication bandwidth. 15th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV), 2018.
- [48] C. Bothorel, J. D. Cruz, M. Magnani, B. Micenkov, Clustering attributed graphs: models, measures and methods. *Network Science*, 3(3), pp. 408–444, 2015. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1501.01676>
- [49] X. Fu, P. Feng, B. Li, X. Gao, A two-layer task assignment algorithm for uav swarm based on feature weight clustering. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2019(5), pp. 1–12, 2019. <http://dx.doi.org/10.1155/2019/3504248>
- [50] S. Yan, J. Xu, L. Song, F. Pan, Heterogeneous UAV collaborative task assignment based on extended CBBA algorithm. 7th International Conference on Computer and Communication, 2022.





The effects of sensor and feature level fusion methods in multimodal emotion analysis

Çok modlu duygu analizinde sensör ve özellik seviyesi füzyon yöntemlerinin etkileri

Bahar Hatipoğlu Yılmaz^{1,*} , Cemal Köse² 

¹ Karadeniz Technical University, Department of Computer Engineering, 61000, Trabzon Türkiye

Abstract

Fusion-based studies on multimodal emotion recognition (MER) are very popular nowadays. In this study, EEG signals and facial images are fused using Sensor Level Fusion (SLF) and Feature Level Fusion (FLF) methods for multimodal emotion recognition. The general procedure of the study is as follows. First, the EEG signals are converted into angle amplitude graph (AAG) images. Second, the most unique ones are automatically identified from all face images obtained from video recordings. Then, these modalities are fused separately using SLF and FLF methods. The fusion approaches were used to combine the obtained data and perform classification on the integrated data. The experiments were performed on the publicly available DEAP dataset. The highest accuracy was 82.14% with 5.26 standard deviations for SLF and 87.62% with 6.74 standard deviations for FLF. These results show that this study makes an important contribution to the field of emotion recognition by providing an effective method.

Keywords: Multimodal emotion recognition, Sensor level fusion, Feature level fusion, DEAP dataset

1 Introduction

Emotion can be defined as an important characteristic of humans associated with feelings, behaviors, etc. [1, 2]. Emotion recognition has become a significant research area for communication between people, reasoning, effective decision-making, etc. Many researchers have studied emotion recognition using various modalities such as speech, body gestures, facial images, electroencephalogram (EEG), etc. Studies that focus on only one modality, such as speech or EEG, are referred to as unimodal studies. With advancements in technology and research, researchers have increasingly turned their attention to multimodal studies that utilize two or more different modalities simultaneously. These multimodal studies provide researchers with effective and efficient fusion methods, combining different modalities. In this regard, multimodal emotion recognition (MER) systems play an important role in advancing emotion recognition research.

Öz

Füzyon tabanlı çok modlu duygu tanıma (MER) çalışmaları günümüzde oldukça popülerdir. Bu çalışmada, çok modlu duygu tanıma için EEG sinyalleri ve yüz görüntüleri sensör seviyesinde füzyon (SLF) ve özellik seviyesinde füzyon (FLF) yöntemleri ile birleştirilmiştir. Çalışmanın genel akışı şu şekildedir. İlk olarak EEG sinyalleri açı genlik grafiği (AAG) görüntülerine dönüştürülmektedir. İkinci olarak, video kayıtlarından elde edilen tüm yüz görüntülerinden en benzersiz olanlar otomatik olarak belirlenmektedir. Daha sonra, bu modaliteler SLF ve FLF yöntemleri kullanılarak ayrı ayrı birleştirilmektedir. Elde edilen verileri birleştirmek ve bütünlük verileri üzerinde sınıflandırma yapmak için füzyon yaklaşımları kullanılmıştır. Deneyler halka açık DEAP veri kümesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. En yüksek doğruluk SLF için 5.26 standart sapma ile %82.14 ve FLF için 6.74 standart sapma ile %87.62 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, bu çalışmanın etkili bir yöntem sunarak duygu tanıma alanına önemli bir katkı sağladığını göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Çok modlu duygu tanıma, Sensör seviyesinde füzyon, Özellik seviyesinde füzyon, DEAP veri seti

In the literature, numerous multimodal studies that integrate different modalities have been conducted for MER. Some remarkable studies utilizing different modalities for MER are outlined as follows. Verma and Tiwary [3] proposed an investigation into emotion representation models and the recognition of emotions from measured physiological signals. They employed the DEAP dataset and applied discrete wavelet transform for analyzing emotional signals. Additionally, they utilized four different classifiers Support Vector Machine (SVM), Multilayer Perceptron (MLP), k -Nearest Neighbor (k -NN), and Meta-multiclass (MMC). Their average results showed 81.45% accuracy with SVM, 74.37% with MLP, 57.74% with k -NN, and 75.94% with MMC, respectively. Luo et al. [4] proposed a MER system based on oil painting stimuli. They presented an emotional dataset with three emotional states named negative, neutral, and positive. In this dataset, they recorded EEG and eye-tracking data from 20 subjects with 114 oil painting stimuli. Additionally, they used accuracy and F1-

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: baharhatipoglu@ktu.edu.tr (B. Hatipoğlu Yılmaz)
Geliş / Recieved: 16.04.2024 Kabul / Accepted: 25.06.2024 Yayımlanma / Published: 15.10.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1469289

score metrics to evaluate the performance of the study. They obtained 89.12 ± 4.26 with SVM and 94.72 ± 1.47 with their proposed method. Njoku et al. [5] proposed to compare the performance of deep learning models for MER. They applied early fusion, hybrid fusion, and multi-task learning. In the early fusion, hybrid fusion, and multi-task learning approaches, they achieved 78.41%, 68.33%, and 78.75%, respectively. Pan et al. [6] proposed a deep learning-based MER system. They integrated facial expressions, speech, and EEG modalities to improve performance, employing a Decision Level Fusion (DLF) technique. They used CK+, EMO-DB, and MAHNOB-HCI datasets to perform their proposed method. For the CK+ dataset, they achieved 98.27%, and for the EMO-DB dataset, they achieved 94.36%.

In this study, we utilized EEG signals and facial images together for MER, and similar studies that employed these modalities are listed as follows. Li et al. [7] utilized EEG signals and facial images for emotion recognition. They applied a DLF fusion method and tested their proposed approach on DEAP and MAHNOB-HCI datasets. Zhao and Chen [8] also employed EEG signals and facial expressions. They extracted facial expression features using the bilinear convolution network (BCN) and fused these features using a three-layer bidirectional LSTM. Additionally, they tested their method on DEAP and MAHNOB-HCI datasets. Similarly, Zhao and Chen employed a transfer learning model for facial expression detection and used an SVM classifier to detect EEG targets labeled as Arousal (ARO) or Valence (VAL). Finally, they adopted two DLF methods corresponding to the enumerate weight rule or an adaptive boosting technique to combine the modalities. They also evaluated their study using DEAP and MAHNOB-HCI datasets. Huang et al. [9] proposed two distinct DLF approaches and tested them on the DEAP and MAHNOB-HCI datasets. Yin et al. [10] used a Multiple-Fusion Layer-based Ensemble Classifier of Stacked Auto-Encoder (MESAE) to evaluate their MER system on the DEAP dataset.

In our work, we proposed SLF and FLF methods. In the first stage, EEG signals were transformed into AAG images. Subsequently, peak frames were automatically selected from all facial images using the maximum dissimilarity-based method (MAX-DIST). For SLF, these image modalities were merged before the feature extraction technique, and all subsequent stages, including feature extraction and classification, were performed on the merged images. For FLF, features were extracted separately from EEG images and facial images, followed by a fusion of the extracted features. After both fusion approaches, k -NN and SVM algorithms were applied for classifications. Furthermore, each modality was also classified separately to show the specific contribution of our study.

The rest of this paper is organized as follows: Section (2.1.1) presents a detailed overview of the DEAP dataset. Section (2.1.2) describes the angle-amplitude transformation method. Subsequently, Section (2.1.3) provides details on the selection and preparation of facial images. Sections (2.1.4) and (2.1.5) explain the methods used for feature

extraction and classification. In Section (3), SLF and FLF methods are outlined. Finally, the experimental results and conclusions are presented in the last two sections.

2 Material and Methods

2.1 Dataset description

2.1.1 DEAP dataset

We evaluated the performance of a MER system using the well-known DEAP dataset [11]. The DEAP dataset was collected by a group of researchers at Queen Mary University. The dataset includes EEG and physiological signals recorded from 32 healthy subjects, with face videos recorded from the first 22 subjects. For all experiments in this study, we exclusively utilized data from the first 22 subjects, excluding s03, s05, s11, s14, and s20.

In the DEAP dataset, 32-channel EEG data were acquired following the international 10/20 electrode placement with a sampling frequency of 512~Hz. The data were preprocessed to remove outliers, and the recorded signals were down-sampled to 128~Hz. Additionally, a bandpass filter with cutoff frequencies of 4.0-45.0~Hz was applied.

In this paper, we focused on utilizing the EEG and face image modalities from the dataset. Our experiments were specifically conducted on the ARO and VAL dimensions. To categorize the trials, we set a threshold of 5, dividing them into two classes based on the rated levels of ARO and VAL. Specifically, for both ARO and VAL dimensions, ratings higher than 5 were labeled as positive classes, while ratings lower than 5 indicated negative classes.

2.1.2 Angle amplitude transformation

We implemented the angle-amplitude transformation (AAT) as previously suggested in our works [12, 13, 14]. But, in this work, the angle and amplitude values were computed using only the signals' maximum (max.) points, as illustrated in Figure 1. Specifically, all calculations were performed from max points to min points, and no calculations were conducted in the opposite direction (from min points to max points). Figure 1 provides a representation of a sample signal.

- Detect all of the local max and min points on a signal.
- Calculate the Euclidean distances between the right and left min points of each max point.
- Calculate the angle values (according to the tangent formula) between the left and right lines of a max point.
- Determine the amplitude value of the current max point belonging to the magnitude of left and right lines.
- Locate the angle and corresponding amplitude values to the quadrants of the graph.

Further mathematical details of the algorithm can be found in [12, 13]. Sample signal images obtained from the EEG signals are presented in Figure 2. In this figure, the upper side displays ARO class images, while the lower side shows VAL class images.

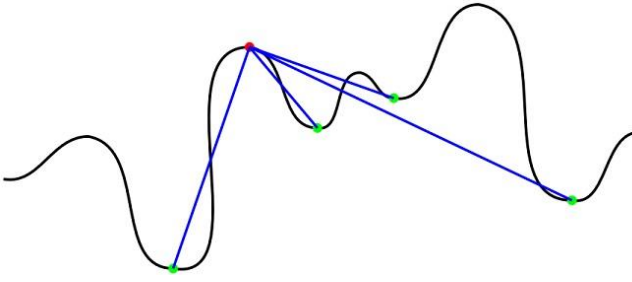


Figure 1. A representation of max. and min. points on a signal

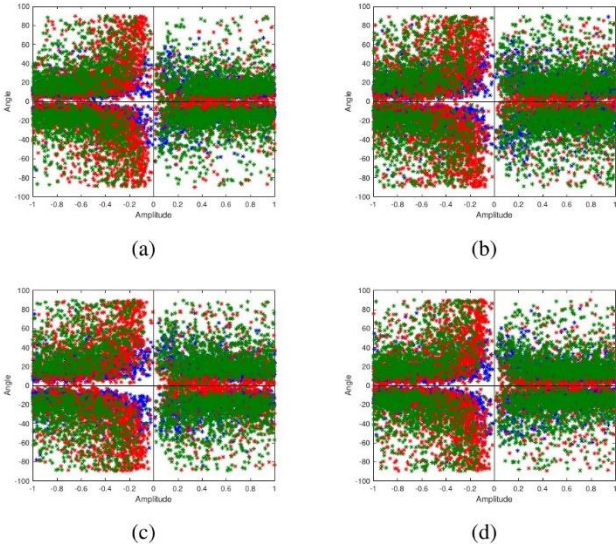


Figure 2. A representation of max. and min. points on a signal

2.1.3 Peak frame selection from face images

We automatically identified unique facial images, referred to as peak frames, from a face image sequence using the MAX-DIST method, as proposed in [15]. Notably, we incorporated Local Binary Patterns (LBP) for feature extraction, differing from their original algorithm. The algorithm is described as follows. Initially, we labeled a video sequence as $V=\{V_1, V_2, \dots, V_N\}$, where N is the number of frames. A sample video sequence belonging to a female subject, along with its peak frame, is illustrated in Figure 3. Subsequently, we created an $N \times N$ -sized dissimilarity matrix $M(i, j)$, where $i, j \in \{1, 2, \dots, N\}$. The dissimilarity matrix was computed using the chi-square distance between LBP features extracted from all facial images. We calculated the average dissimilarity score d_j between the remaining $N - 1$ frames and the j -th frame in the M matrices. Finally, we sorted the averages in descending order and identified the highest mean K values as peak frames. In this study, we chose $K = 1$, indicating that only the first image was used as the peak frame.

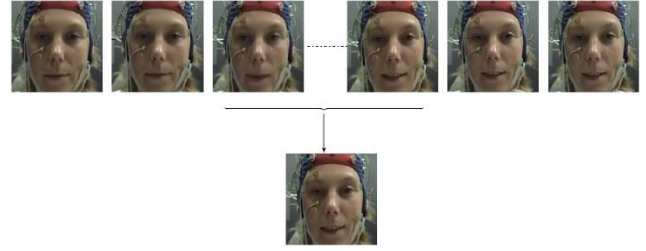


Figure 3. A female image sequence and its peak frame belongs DEAP dataset

2.1.4 Feature extraction

2.1.4.1 Local binary pattern

In this paper, we utilized the Local Binary Pattern (LBP) and Scale Invariant Feature Transform (SIFT) algorithms for feature extraction. LBP is an algorithm designed for identifying image textures [16]. The basic concept behind the LBP operator is that 2D surface textures can be characterized by two descriptive measures, namely local spatial patterns and gray-scale contrast [17]. The advantages of the LBP algorithm lie in its sensitivity to ambient lighting changes and its low computational cost. The algorithm operates by comparing the gray-level values of the eight pixels in the 3×3 neighborhood around the central pixel [18]. Consequently, the LBP operator can be conceptualized as an ordered set of pairwise comparisons between gray levels of the central pixel.

2.1.5 Classification

2.1.5.1 K-nearest neighbor

k -Nearest Neighbor (k -NN) is one of the well-known methods in machine learning utilizing supervised learning principles, which was initially introduced by Evelyn Fix and Joseph Hodges in 1951 [19]. The algorithm can be described as follows.

- k training set samples with known labels (neighbor points) are selected.
- The distance is calculated between k neighbor points and the test sample with Euclidean distance metric $d(x, y) = \sqrt{(\sum_{i=1}^k (x_i - y_i)^2)}$.
- According to the distance value, k nearest neighbor points are chosen.
- The number of training samples in each category of these k neighbors is determined.
- The category of the test sample is determined by looking at the majority of the categories.

2.1.5.2 Support vector machine

Support Vector Machine (SVM) was originally developed by Cortes and Vapnik [20]. Particularly in everyday problems, linearly separable data are quite rare. Hence, SVM, known for its high generalization ability, has been widely employed in the literature [20, 21]. SVM fundamentally aims to discover the optimal separating hyperplane for linearly separable data and conducts classification based on this hyperplane. In other words, the SVM mechanism is designed to identify the most suitable

classifying hyperplanes that meet the classification requirements [22]. In this study, we used the radial basis kernel function as the kernel function.

3 Fusion methods

3.1 Sensor level fusion

In this study, we applied a novel Sensor Level Fusion (SLF) using transformed 2D signal images and facial images. This involved merging signal images derived from recorded EEG signals with facial images, creating a single image where these two types of images were positioned side by side. The resulting combined image was then utilized to observe the contribution to the classification process. An illustrative representation of the merged image is presented in Figure 4. As depicted in Figure 4, the process begins by automatically detecting peak frame face images using an algorithm. Subsequently, the signal is transformed into the AAG image version. Finally, these two images are merged to form the final representation.

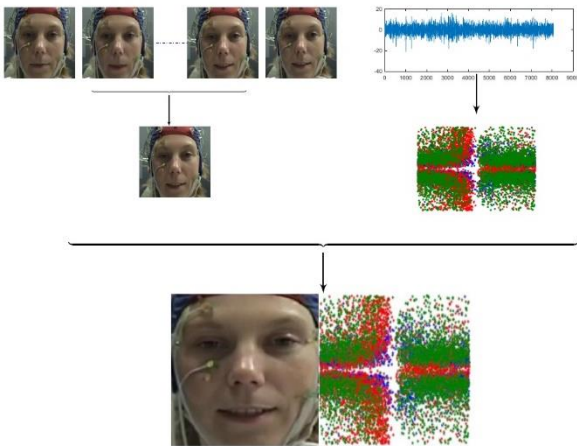


Figure 4. Merging a peak frame and signal image representation for SLF

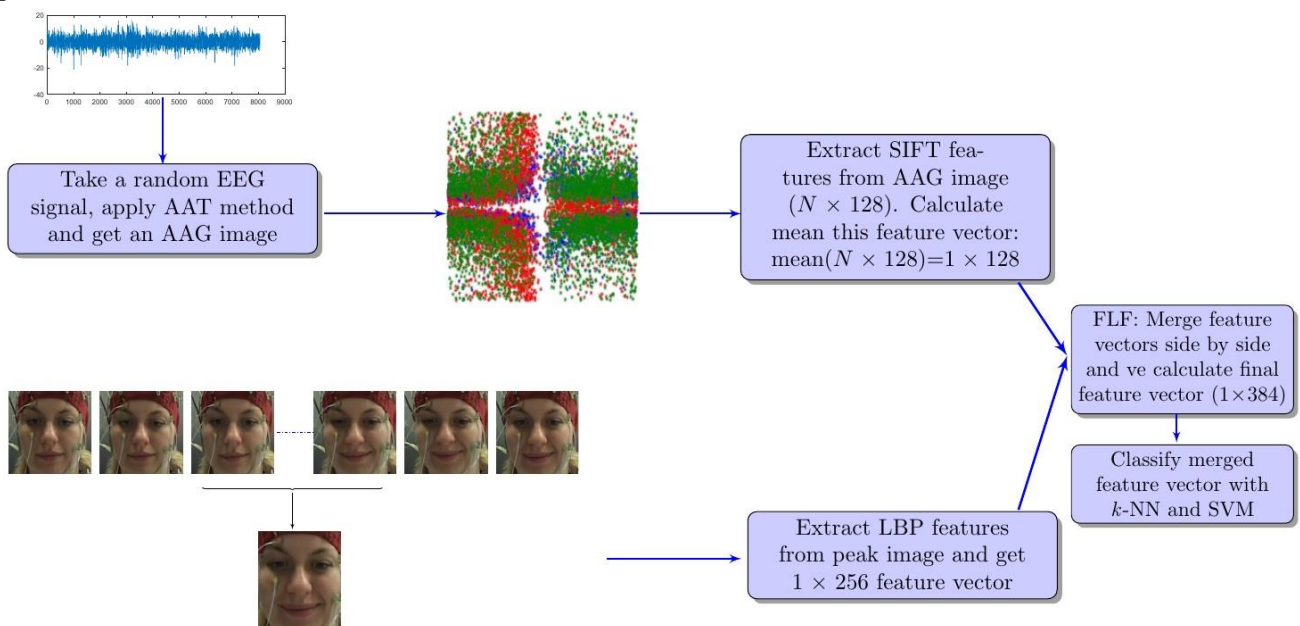


Figure 5. A representation of feature level fusion for a female subject in DEAP dataset

3.2 Feature level fusion

In this study, we also applied a Feature Level Fusion (FLF) method that incorporated signal and face images. The fusion process took place after the feature extraction section, and the FLF method can be summarized as follows. To extract features from signals, the signals were transformed into 2D images, and the SIFT algorithm was applied to these images. Consequently, each image generated a varying number of descriptors ($N \times 128$, where N is the number of descriptor vectors). Subsequently, the N descriptors were averaged to obtain a unique descriptor of size (1×128). The averaging of SIFT vectors was inspired by [23-26].

For extracting features from faces, frontal face videos were divided into individual frames, and their peak frames were automatically detected. Then, LBP was applied to these peak frames, resulting in a 1×256 -sized feature vector. After obtaining the feature vectors from both types of images, these vectors were fused. The final fusion vector, of size 1×384 , was calculated by concatenating them sequentially. An illustrative representation of the FLF algorithm is provided in Figure 5.

4 Experimental results

We aimed to propose novel sensor-level and feature-level fusion approaches. Additionally, we introduced a new AAT that utilizes only angle-amplitude values calculated from max points to min points. The procedure of the paper can be concisely summarized as follows. Firstly, we transformed signals into 2D images and automatically identified peak frames from frontal face videos. Then, for SLF, we merged the signal images and peak frames before feature extraction. Features were extracted from these merged images using LBP and finally, the features were classified using k -NN and SVM algorithms. For FLF, we extracted LBP features from peak frames and SIFT features from signal images. Consequently, these modalities were fused after feature extraction.

Finally, we classified the fused features with k -NN and SVM algorithms. We evaluated these new approaches on publicly available DEAP benchmark datasets. The performances were evaluated using the accuracy measure as given in Equation (1). In this notation, TP is the number of positive samples correctly identified, TN is the number of negative samples correctly identified, FP is the number of negative cases incorrectly identified, and FN is the number of positive cases incorrectly identified.

$$CA = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (1)$$

We divided the DEAP dataset into 10 subsets. Accordingly, we used one of them as the test data and the others as the training data. Also, we repeated this procedure ten times and calculated the final accuracy by averaging the results. Because parameter selection plays an important role in classification, we identified the parameters associated with feature extraction and classification exclusively through the utilization of training data. For the feature extraction stage, the radius is an important parameter related to the LBP and SIFT algorithms. The optimal radius (r) values of these algorithms are searched in the range of $1 \leq r \leq 3$. In this work, the SIFT algorithm is used with Harris corner detection. Additionally, t and σ values are important parameters related to Harris. The optimal t and σ values of the algorithm are searched in the range of $1000 \leq t \leq 3000$ and $3 \leq \sigma \leq 6$, respectively. For the classification stage, k is an important parameter related to the k -NN algorithm. The optimal k value of the algorithm is searched in the range of $1 < k \leq (training\ set \div 2)$. Similarly, C and γ values are important parameters related to the SVM. The optimal C and γ values of the algorithm are searched in the range of $2^{-15} \leq C \leq 2^{+15}$ and $1 \leq \gamma \leq 300$ respectively.

Table 1. CA (%) results and standard deviations for ARO and VAL dimensions on DEAP dataset

Method	Face Images	AAG Images	SLF	FLF
k -NN-ARO	65.99 ±10.67	80.67±6.84	82.14±5.26	87.26±4.52
SVM-ARO	67.33 ±9.81	78.87±4.91	81.59±6.13	86.04±7.52
k -NN-VAL	58.39 ±7.22	77.38±5.47	80.69±4.39	85.24±4.27
SVM-VAL	61.38 ±7.58	78.61±3.71	78.87±5.56	87.62±6.74

Table 2. Comparison with Studies Conducted on the DEAP Dataset

Study	ARO	VAL
[3]	81.45	-
[8]	86.8	86.2
[10]	77.19	76.17
[7] (for Enumerator fusion)	58.75 ±12.26	71.00±7.00
[7] (for Adaboost fusion)	59.00 ±10.74	70.25 ±8.25
[9] (for First fusion)	74.23 ±10.34	80.30 ±11.37
[9] (for Second fusion)	71.54 ±11.16	80.00 ±12.40
Proposed method (for SLF)	81.59±6.13	80.69±4.39
Proposed method (for FLF)	87.26±4.52	87.62±6.74

The average classification accuracies across all subjects are shown in Table 1. The first column shows method (classifier-dimension pair) names. The second and third columns show the only face and AAG image classification accuracies. The last two columns show the fusion results (the fourth column for SLF and the fifth one for FLF). For ARO dimension, k -NN shows 65.99% for face images, 80.67% for AAG images, 82.14% for SLF, and 87.26% for FLF. Similarly, the SVM classifier shows 67.33% for face images, 78.87% for AAG images, 81.59% for SLF, and 86.04% for FLF. For VAL dimension, k -NN achieves 58.39% accuracy for face images, 77.38% for AAG images, 80.69% for SLF, and 85.24% for FLF. Similarly, SVM shows 61.38% accuracy for face images, 78.61% for AAG images, 78.87% for SLF, and 87.62% for FLF.

Looking at all the results, AAG images have better classification accuracy than face images. Besides, the FLF approach achieves better accuracy than the SLF approach. Generally, better results are observed for ARO. Additionally, k -NN and SVM achieved better accuracy for ARO. For all results, achieved standard deviations are within acceptable ranges. A graphical comparison of all results is also given in Figure 6.

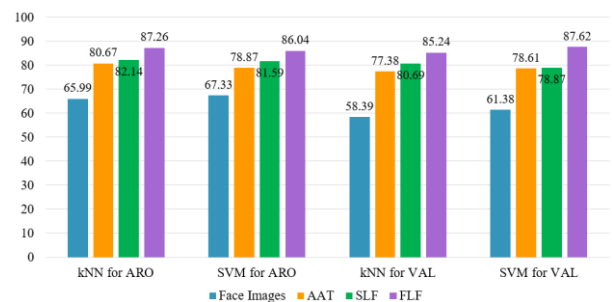


Figure 6. A graphical representation of DEAP dataset results

Additionally, there is a comparison table (Table 2) that includes studies in the literature. The first column of the table presents the related studies, while the second and third columns present the results for ARO and VAL. In order to provide a comprehensive understanding of the performance of the proposed methods, we have compared our results with several existing studies in the literature and listed a summary of the main findings from these studies in the following. [3] achieved an ARO accuracy of 81.45% but VAL was not reported. [7] got moderate accuracy levels, with Enumerator fusion yielding 58.75±12.26 for ARO and 71.00±7.00 for VAL, and Adaboost fusion resulting in 59.00±10.74 for ARO and 70.25±8.25 for VAL. [8] proposed two DLF methods based on the enumerate weight rule or an adaptive boosting technique to combine the face and EEG modalities. They achieved ARO and VAL accuracies of 86.8% and 86.2%, respectively. [9] yielded 74.23±10.34 for ARO and 80.30±11.37 for VAL with the first fusion method, while showed 71.54±11.16 for ARO and 80.00±12.40 for VAL with the second fusion method. Analyzing these studies, it is evident that the highest accuracy values for ARO and VAL

are achieved in [8]. In conclusion, the proposed FLF method demonstrates a significant improvement over existing studies, with an increase of 0.46% for ARO and 1.42% for VAL compared to the highest values reported in the literature. These results highlight the effectiveness of our approach in enhancing emotion recognition accuracy, offering a more robust and reliable solution.

5 Conclusion

We have evaluated the effect of sensor and feature-level fusion methods on MER using the famous DEAP dataset. We have also classified the modalities (signal images and face images) separately to better illustrate the contribution of fusion methods. In summary, (i) we first applied our original signal to image transformation method to the signals, (ii) we detected the peak frames between all facial images, (iii) then utilized our SLF and FLF methods, and (iv) finally we extracted and classified features according to the fusion methods. For a single trial classification, we conducted the experiments as a two-class classification experiment that ratings for ARO and VAL. For SLF, we got the best average classification accuracies with k -NN as 82.14% with 5.26 standard deviation for ARO. To the best of our knowledge, this is the first study to use SLF for MER, although the expected results were not obtained. Similarly, for FLF, we got the best average classification accuracies of 87.62% with 6.74 standard deviation for VAL. The achieved classification accuracies underscore the robustness and effectiveness of our proposed methodology, emphasizing its significant performance in MER tasks.

In future work, we will further aim to propose a novel multi-modal dataset to investigate the role of different modalities in emotion recognition process. Besides, we will combine the results on decision-level to improve the reliability and performance of our proposed approach.

Acknowledgment

This research was supported by the Turkish Scientific and Research Council (TUBITAK) through project 121E002 and 119E397.

Conflict of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity Rate (iThenticate): %19

References

- [1] A. F. M. N. H. Nahin, J. M. Alam, H. Mahmud and K. Hasan, Identifying emotion by keystroke dynamics and text pattern analysis. *Behaviour & Information Technology*, 33(9), 987–996, 2014. <https://doi.org/10.1080/0144929X.2014.907343>.
- [2] A. Sapra, N. Panwar, and S. Panwar, Emotion recognition from speech. *International journal of emerging technology and advanced engineering*, 3(2), 341-345, 2013.
- [3] G. K. Verma, and U. S. Tiwary, Multimodal fusion framework: A multiresolution approach for emotion classification and recognition from physiological signals. *NeuroImage*, 102, 162-172, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.11.007>.
- [4] S. Luo, Y. T. Lan, D. Peng, Z. Li, W. L. Zheng, and B. L. Lu, Multimodal Emotion Recognition in Response to Oil Paintings. 44th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, pp. 4167-4170, 2022. <https://doi.org/10.1109/EMBC48229.2022.9871630>.
- [5] J. N. Njoku, A. C. Caliwag, W. Lim, S. Kim, H. Hwang, and J. Jung, Deep learning-based data fusion methods for multimodal emotion recognition. *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, 47(1), 79-87, 2022. <https://doi.org/10.1109/10.7840/kics.2022.47.1.79>.
- [6] J. Pan, W. Fang, Z. Zhang, B. Chen, Z. Zhang, and S. Wang, Multimodal Emotion Recognition based on Facial Expressions, Speech, and EEG. *IEEE Open Journal of Engineering in Medicine and Biology*, 2023. <https://doi.org/10.1109/10.7840/10.1109/OJEMB.2023.3240280>.
- [7] R. Li, Y. Liang, X. Liu, B. Wang, W. Huang, Z. Cai, and J. Pan, MindLink-eumpy: an open-source python toolbox for multimodal emotion recognition. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15, 621493, 2021. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.621493>.
- [8] Y. Zhao and D. Chen, Expression eeg multimodal emotion recognition method based on the bidirectional lstm and attention mechanism. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 1-12, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/9967592>.
- [9] Y. Huang, J. Yang, S. Liu, J. Pan, Combining Facial Expressions and Electroencephalography to Enhance Emotion Recognition. *Future Internet*, 11(5):105, 2019. <https://doi.org/10.3390/fi11050105>.
- [10] Z. Yin, M. Zhao, Y. Wang, J. Yang, and J. Zhang, Recognition of emotions using multimodal physiological signals and an ensemble deep learning model. *Computer methods and programs in biomedicine*, 140, 93-110, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2016.12.005>.
- [11] S. Koelstra, C. Muhl, M. Soleymani, J. S. Lee, A. Yazdani, T. Ebrahimi, and I. Patras, Deap: A database for emotion analysis; using physiological signals. *IEEE transactions on affective computing*, 3(1), 18-31, 2011. <https://doi.org/10.1109/T-AFFC.2011.15>.
- [12] B. Hatipoğlu, C. M. Yılmaz and C. Kose, A signal-to-image transformation approach for EEG and MEG signal classification. *Signal Image and Video Processing*, 13, 483–490, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11760-018-1373-y>.
- [13] B. Hatipoğlu Yılmaz, C. M. Yılmaz and C. Kose, Diversity in a signal-to-image transformation approach for EEG-based motor imagery task classification. *Medical Biological Engineering Computing*, 58, 443–459, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11517-019-02075-x>.
- [14] B. Hatipoğlu Yılmaz and C. Kose, A novel signal to image transformation and feature level fusion for multimodal emotion recognition. *Biomedical*

- Engineering / Biomedizinische Technik, 66 (4), 353-362, 2021. <https://doi.org/10.1515/bmt-2020-0229>.
- [15] S. Zhalehpour, Z. Akhtar, and C. Eroglu Erdem, Multimodal emotion recognition based on peak frame selection from video. *Signal, Image and Video Processing*, 10, 827-834, 2016. <https://doi.org/10.1109/INISTA.2014.6873606>.
- [16] W. Yu, L. Gan, S. Yang, Y. Ding, P. Jiang, J. Wang and S. Li, An improved LBP algorithm for texture and face classification. *Signal Image and Video Processing*, 8, 155–161, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11760-014-0652-5>.
- [17] Matti Pietikäinen, Local Binary Patterns. http://www.scholarpedia.org/article/Local_Binary_Patterns, Accessed 13 March 2024.
- [18] C. Turan, and K. M. Lam, Histogram-based local descriptors for facial expression recognition (FER): A comprehensive study. *Journal of visual communication and image representation*, 55, 331-341, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2018.05.024>.
- [19] Behzad Javaheri, KNN with Examples in Python, <https://domino.ai/blog/knn-with-examples-in-python>, Accessed 14 March 2024.
- [20] T. Fletcher, Support vector machines explained. Tutorial paper, 1-19, 2009.
- [21] C. J. Burges, A tutorial on support vector machines for pattern recognition. *Data mining and knowledge discovery*, 2(2), 121-167, 1998.
- [22] A. Yuexuan, D. Shifei, S. Songhui and L. Jingcan, Discrete space reinforcement learning algorithm based on support vector machine classification. *Pattern Recognition Letters*, 111, 30-35, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2018.04.012>.
- [23] T. Q. Anh, P. Bao, T. T. Khanh, B. N. D. Thao, T. A. Tuan and N. T. Nhut, Video retrieval using histogram and sift combined with graph-based image segmentation. *Journal of Computer Science*, 8(6), 853, 2012. <https://doi.org/10.3844/jcscsp.2012.853.858>.
- [24] N. D. Anh, P.T. Bao, B. N. Nam, N.H. Hoang, A New CBIR System Using SIFT Combined with Neural Network and Graph-Based Segmentation. In: Nguyen, N.T., Le, M.T., Świątek, J. (eds) *Intelligent Information and Database Systems. Lecture Notes in Computer Science*, 5990. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12145-6_30.
- [25] J. Xu, K. Lu, X. Shi, S. Qin, H. Wang and J. Ma, A DenseUnet generative adversarial network for near-infrared face image colorization. *Signal Processing*, 183, 108007, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2021.108007>.
- [26] H. Lacheheb, and S. Aouat, SIMIR: new mean SIFT color multi-clustering image retrieval. *Multimedia Tools and Applications*, 76, 6333-6354, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11042-015-3167-3>.





Automated fabric inspection system development aided with convolutional autoencoder-based defect detection

Evrişimli otokodlayıcı tabanlı hata tespiti ile desteklenen otomatik kumaş inceleme sistemi geliştirilmesi

Muharrem Mercimek^{1,*} , Muhammed Ali Nur Öz² , Özgür Turay Kaymakçı³ 

¹ Department of Control and Automation Engineering, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Yıldız Technical University, İstanbul, Türkiye

² Hendek Vocational School, Sakarya University of Applied Sciences, Sakarya, Türkiye

³ Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Canakkale Onsekiz Mart University, Canakkale, Türkiye

Abstract

Industrial automatic fabric inspection system, a critical technology in the industry, enhances both total production quantity and quality compared to conventional inspection techniques. This study aims to create a reliable and effective real-time automated visual inspection system for fabrics, focusing on defect detection. The goals of the study can be stated as; installing a system with advanced technology for capturing and processing images swiftly, the development and deployment of a system capable of autonomously learning and scanning fabrics in use, and the creation of a smart framework for accurate fabric defect detection and classification. We focus on the development of unsupervised fabric defect detection using a convolutional autoencoder model, and defect classification using a convolutional neural network model, which takes input as the feature vector generated by the convolutional autoencoder. The experimental outcomes have displayed significant success rates in both detecting defects and classifying them, confirming the effectiveness of the framework in real-time visual inspection systems.

Keywords: Fabric defect detection, Fabric inspection system, Convolutional autoencoder.

1 Introduction

The process of fabric inspection involves checking and assessing textile lots to make sure they meet certain standards, specifications, or requirements, as well as measuring the fabrics to verify that they meet the necessary criteria. Color, appearance, fabric construction, printing defects, and cross-shading are usually checked during a fabric inspection. By controlling fabrics, it is possible to determine where any defects may be and also to get more yields from production, thus guaranteeing that the materials to be manufactured in the future are having the highest quality. In the traditional visual inspection system, a single individual is responsible for all the inspection tasks and report writing. This method has the potential to introduce

Öz

Endüstriyel otomatik kumaş inceleme sistemi, endüstride klasik inceleme tekniklerine göre hem toplam üretim miktarını hem de kaliteyi artıran kritik bir teknolojidir. Bu çalışma, kumaşlar için güvenilir ve etkili bir gerçek zamanlı otomatik görsel inceleme sistemi oluşturmayı amaçlamaktadır ve odak noktası olarak hata tespiti üzerinde yoğunlaşmaktadır. Çalışmanın hedefleri; hızlı bir şekilde görüntüleri yakalama ve işleme yeteneğine sahip gelişmiş teknolojiye sahip bir sistem kurmak, kullarımdaki kumaşları otomatik olarak öğrenme ve tarayabilme yeteneğine sahip bir sistem geliştirme ve, doğru kumaş hata tespiti ve sınıflandırması için akıllı bir yaklaşım oluşturmak şeklinde ifade edilebilir. Çalışmada, evrişimli otokodlayıcı modeli kullanarak denetimsiz bir kumaş hata tespiti ve evrişimli sinir ağı modeli kullanarak hata sınıflandırma geliştirme işlemleri üzerinde durulmaktadır. Sınıflandırmada kullanılan evrişimli sinir ağının girişine evrişimli otokodlayıcı tarafından üretilen özellik vektörü sunulmaktadır. Deney sonuçları analiz edildiğinde, hem hataları tespitinde hem de bunları sınıflandırmada önemli başarı sergilenmiştir ve yaklaşımın gerçek zamanlı görsel inceleme sistemlerindeki etkinliğini gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kumaş hatası tespiti, Kumaş inceleme sistemi, Evrişimli otokodlayıcı.

human errors and slow down textile production. Commonly the defects are detected and classified with the help of artificial intelligence (AI) supported systems. The basic requirement of AI training is presenting the related datasets. The manufacturer piles up thousands of defect-free and defective image samples for a certain operation period from the initial setup. Afterward, trained models are obtained for testing or indeed for visual inspection and evaluation tasks. These systems permit manufacturers to store data regarding both fabric defects and repairs and generate relevant reports.

The formation of fabric is accomplished by joining fabric fibers in different ways. At the end of the manufacturing process, fabric surfaces may display errors known as defects, and it is estimated that this decreases fabric sales prices by

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mercimek@yildiz.edu.tr (M. Mercimek)

Geliş / Recieved: 10.05.2024 Kabul / Accepted: 08.07.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1481769

45% to 60% [1]. The goal of quality control is to detect and locate any imperfections in the fabric. Due to fatigue and carelessness, the control process done by people can cause human errors. Thus, automatic optical fabric inspection systems have been designed to produce better-quality fabrics in greater quantities. Automatic fabric defect inspection systems, with all the required components, can detect mistakes at a rate of 90%, whereas traditional methods only manage to do so at a rate of 60% [2].

Despite the potential of automated inspection systems to be free of human mistakes, the complexity of more than 60 types of fabric defects and the speed of the inspection table still make these systems error-prone [3]. Various fabric defect inspection techniques with high detection rates have been studied, yet they are not suitable for real-time operation due to their high processing load or they can only detect fabric defects of a few fabric types. Despite the solutions that have been implemented in the market, there is still a demand to develop systems for various fabrics and defects. The manufacturer must invest in updating the inspection system for any fabric they plan to manufacture. This is commonly observed when the utilized approaches for the analysis involve efforts other than machine learning.

This study is mainly focused on efforts towards producing a real-time smart inspection system that utilizes deep learning-based inspection to reduce the need for feature selection and also processes large amounts of data more effectively than traditional methods. This differs from the majority of studies found in the literature, which have been developed for ideal laboratory conditions with non-moving textile lots and minimal noise. A system is investigated that is capable of detecting over 90% of significant fabric defects on plain fabric samples. Efforts have been made to address identified deficiencies through the development of an autonomous system. Deep learning, which does not necessitate feature selection and has a lower processing load, is utilized. An offline system is developed to quickly adjust the parameters of the devised methods for the fabrics. An AI framework is studied based on the convolutional autoencoders (CAE), model both for defect detection and classification. This framework is designed to perform defect detection, thereby identifying defects that do not conform to the fabric weave pattern. The classification of identified fabric defects is established using a convolutional neural network (CNN) model, which accepts input as the feature vector generated by CAE. This classification process allows for the determination of fabric quality based on designated categories. To facilitate the mapping of detected and classified defects, a defect localization system is also implemented, and the data related to identified defects and their locations can be stored in the database.

In Section 2, we will first discuss conventional approaches found in existing literature dealing with fabric defects, addressing the necessity of AI-based defect detection and classification. Following that, we will discuss AI-based methods, with the main focus on the convolutional autoencoder used in this study. In Section 3, the visual inspection system configuration is introduced with its hardware components, and the dataset acquired with the

inspection system is explained. The experimental results and a comprehensive analysis of the outcomes of the AI framework for fabric defect detection and classification are presented in Section 4. Finally, in Section 5, the study concludes by highlighting the accomplishments and discussing the potential future work.

2 Related Work

The utilization of computer-based quality control systems is commonly needed when the manufacturing process cost is very high in the medium and long term. The most important component for such a system is to have an image acquisition setup suitable for detecting errors with the least amount of effort to be spent in image processing. To address these issues, automated fabric inspection systems have been developed. It has been stated that 70% of the defects on fabric surfaces can be detected in generic visual inspection tasks. A group of commercial products by Agteks as quality bar and finishing bar are declared to be used as online fabric defect control systems on woven, non-woven, and knitted fabrics [4]. The scanning speed has been stated as 50m/min. Defect location on the fabric, defect image, defective region properties, and assigned defect labels are recorded as the common output of such systems. In general, the detection of fabric defects has relied on manual inspection conducted by an expert. This process involves the expert visually identifying defects in fabric rolls as they pass through an illuminated inspection platform at a speed ranging from 8 to 10 meters per minute. In this regard, there is a trade-off between generating an accurate solution and the system cost & inspection time.

We can outline the primary blocks of defect detection systems as; image transformation, defect detection, and classification. In this section, we discuss the conventional solutions for handling fabrics mentioned in the existing literature, to raise a particular focus on the importance of AI-based defect detection and classification. There is a tremendous number of studies on AI-based fabric defect detection and classification, the Discussion of AI-involved literature will be covered next.

2.1 Defect detection and classification

Raw images obtained through cameras contain a lot of data such as patterns and colors, which is difficult to process and detect defects in. To ensure the system works properly and reduces the processing load, it is important to identify and examine the parts that break the monotony on the fabric. Li et al. categorized fabric defect detection algorithms into two main groups: traditional algorithms and learning-based algorithms [5]. A comprehensive literature review was conducted on both categories. Traditional algorithms, as outlined by the authors, rely on feature extraction methods, encompassing statistical, structural, spectral, and model-based approaches. On the other hand, learning-based algorithms were further subdivided into classical machine learning algorithms and deep learning algorithms. Talu et al. stated that three main groups of methods were proposed in the literature for defect detection; statistical, spectral, and learning-based methods [6].

Statistical methods aim to reveal fabric defects by taking advantage of the fact that the defective parts on the fabric have different statistical properties than the defect-free parts. The biggest advantage of this approach, which is widely used in real-time systems, is its low processing load. Yet, it is very sensitive to noise and it fails to identify different types of defects. Autocorrelation measure and its variations can be used to identify defects in an image by utilizing a metric that takes into account the similarity between pixels [7]. An alternate approach, the co-occurrence matrix, is utilized to measure the repetition of the gray-level pixel distribution values. This method is commonly used for defect detection and can compute low-level statistical parameters quickly and with minimal processing effort. It is possible to determine the location of the defective parts by calculating the first-order statistical parameters of the gray level. Examining the pixels in groups is more effective than examining them individually when carrying out this calculation. One of the techniques that can be used in this context is the fractal dimension method, which measures the geometric structure of the objects [8]. This method, which takes advantage of its geometric structure to separate different objects in the image, has also been used to reveal defects. Although it is a method with a very low processing load, it is still insufficient to determine the location of the defects.

Spectral methods are utilized since standard statistical techniques are not enough to uncover errors concealed by intensity changes in the spatial domain. Forming fabrics through the repetition of simple patterns is a crucial requirement for discovering defects with spectral methods, as they are composed of periodic structures. In contrast, random-textured images are made up of unpredictable gray-level distributions, with no repetition or periodicity. As a result, spectral approaches are not effective in detecting imperfections in materials with a random texture [9]. Fourier transform is a method used to decompose signals to express them as a sum of many signals of different frequencies. It allows extraction of the meaningful information necessary to detect defects by revealing gray-level distributions repeating over the image. The biggest drawback of this popularly used method is that it cannot provide information about where in the image are the distributions of frequencies while providing correct results about the frequency distribution. To overcome this limitation, Wavelet transform can be used [10]. This transform can calculate the frequency spectrum wherein the image is the spectrum component for a temporal interval. However, it is difficult to express patterns in the image using this method. Gabor filters with angular, axial frequency bandwidths and center frequency are more suitable for examining flaws in the image than Fourier and Wavelet transform [11]. The researchers in [6], utilized six different groups of features. Histogram of Oriented Gradient (HoG), Co-occurrence HOG (CoHoG), and Statistical features (energy, contrast, correlation, homogeneity) were the spatial features. The other three included Fast Fourier Transform (FFT), Wavelet, and Shearlet. In addition to these feature extraction methods, they employed several models; Inception V3, MobileNet V2, a Self-Supervised neural

network, and a CNN model trained using the proposed Fourier transform-based defective patch capture algorithm.

Learning-based algorithms have been utilized in many studies for fabric defect detection and classification. A powerful structure to accommodate machine learning strategies, artificial neural networks can create complex decision boundaries and they have been widely used due to their low processing load and ease of training [12]. With the development of advanced data processing capabilities such as cloud computing, more complex neural networks can be created and trained. CNN as the introductory model incorporating these learning strategies can autonomously acquire hierarchical feature representations. In this process, lower layers specialize in getting fundamental features, while higher layers focus on understanding complicated ones. Additionally, CNNs are built to identify patterns within spatial relationships, interpreting them highly efficiently for tasks such as image recognition, where an understanding of the spatial arrangement of pixels is important. Also, pre-trained CNN models on large datasets (like ImageNet) can be fine-tuned for specific tasks, conveying the knowledge gained during the initial training. The study in [13] made use of pre-trained versions of extensively used VGG16, Densenet, Mobilenet, Inception V3, Resnet50, and Xception models.

U-Net (U-shaped Encoder-Decoder Network), a type of CNN different from traditional convolutional deep learning models, performs well with small datasets [14]. Since data sets available for fabric defects are mostly small, U-Net has been commonly utilized for defect detection. The researchers in [15] introduced an innovative model for identifying and categorizing fabric defects. They trained and assessed the model using the AITEX dataset [16]. In this approach, fabric images went through initial processing with U-Net to ascertain the presence of defects. Subsequently, VGG16 (Visual Geometry Group-16) and random forest algorithms were employed for the classification of specific defects within the fabrics. In the paper by Jing et al. [17], researchers employed an enriched architecture of AlexNet for fabric defect classification. They optimized network layers and convolution filters specifically to identify yarn dye defects. In the paper by Guo et al. [18] the atrous spatial pyramid pooling (ASPP) module was used in the YOLOv5 network. They mentioned that this integration facilitated the extraction of multiscale feature information from feature maps encompassing diverse receptive fields. This allowed for the detection of defects of varying sizes without modifying the resolution of the input image. Wang et al. constructed a dual convolutional network (ConvNet) architecture for fabric defect detection [19]. In this setup, the initial ConvNet was dedicated to fabric category classification, while the second ConvNet, specific to each category, was employed for detecting defective regions. In the study by Zhou et al. the study was on the modification of the Faster region-based convolutional neural network (Faster R-CNN) model, creating a deep learning model named FabricNet. Reportedly, the classification success for fabric defects was increased through the use of the deformable convolution block structure [20]. In [21] researchers incorporated a visual

long-short-term memory (VLSTM) module within a CNN framework; they aimed at mimicking human visual perception.

Autoencoders are a type of artificial neural network used in unsupervised learning [22]. Since our ablation study involves the real-time smart inspection system aided by convolutional autoencoders, the discussion of AI-involved literature will continue with autoencoders and will be covered next.

2.2 Autoencoders

Although autoencoders have been known for a long time, their practical applications emerged in the 1980s. What sets autoencoders apart from other types of neural networks is their ability to compress data primarily in hidden layers and then attempt to reconstruct the input data using the compressed data [23]. The fundamental goal of this process is to demonstrate that the features present within the data can be extracted, allowing for the reconstruction of the data. The phase where features are extracted takes place in the hidden layers, which contain the lowest-dimensional data.

This feature is used in studies that aim to have autoencoders discover feature vectors within the data. It is an undeniable fact that finding the features of data is crucial when training neural networks. Using the concept, data to be used for training a network can be generated by another network. When autoencoders reconstruct data, it is expected that they cannot reproduce noisy signals or any pattern-less components present in the input data [24]. Due to this characteristic, they can also be considered for separating data from noise or defects, serving as a key point for our study. Namely, the defects can be highlighted and located within the fabric images. Bergmann et al. improved the autoencoder's performance in defect detection by applying a perceptual loss function [25]. They observed that current techniques resulted in significant residual errors in edge areas with minor localization inaccuracies. To address this issue, they introduced a novel approach employing a perceptual loss function grounded in structural similarity for defect detection. This loss function gauges luminance, contrast, and structural disparities among image patches.

Autoencoders have two different structures within their artificial neural networks, known as the encoder and the decoder. To explain their roles, the neural network in the encoder part is responsible for reducing the dimension of the input data in a way that allows the extraction of features sufficient for the decoder to reconstruct it. On the other hand, the neural network in the decoder part is responsible for enlarging the dimensions of the features extracted by the encoder to reconstruct the input data. The features lying between these two structures find applications in various fields. We can express autoencoders mathematically as;

$$\begin{aligned} \varphi : X &\rightarrow F \\ \gamma : F &\rightarrow X' \end{aligned} \quad (1)$$

$$\varphi, \gamma = \arg \min_{\varphi, \gamma} M(X - X') \quad (2)$$

where φ represents an encoder neural network, γ represents a decoder neural network, X represents the data given as input to the autoencoder and intended to be

reconstructed, F represents the feature data generated by the encoder, and M represents a cost function, X' is the output of the autoencoder. The general autoencoder structure is depicted in Figure 1.

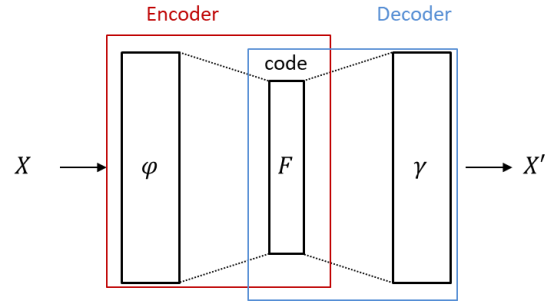


Figure 1. The autoencoder structure [26].

CNN can be used in the encoding and decoding parts of an autoencoder, making it a convolutional autoencoder (CAE). There are various types of autoencoders. From one point of view, they can be categorized into two main headings: regularized autoencoders and variational autoencoders. In another aspect with the development of the autoencoders, one can group methods as single-layer autoencoders and stacked autoencoders.

Essentially autoencoders aim to obtain the input data as the output, they always strive to create a copy mechanism that moves data from input to output. Studies aimed at preventing autoencoders from simply copying data are referred to as regularized autoencoders. Examples of these regularized autoencoders include denoising autoencoders (DAEs) and no-peaking autoencoders. Different approaches have been tried in these models to prevent copying, resulting in successful outcomes. Mei et al. employed the multi-scale convolutional denoising autoencoder (MSCDAE) design, harnessing different image scales produced by the Gaussian pyramid and incorporating a salt-and-pepper noise model into the input image for the training of denoising autoencoders of varying dimensions [27]. As a final example of regularized autoencoders, split-brain autoencoders can be mentioned. The second type is variational autoencoder (VAE), for which generative adversarial networks (GANs) can be given as an example. In GAN, there are at least two competing neural networks [28]. Following its introduction by Goodfellow, the GAN framework has garnered significant interest among researchers [29]. In the paper [30] the researchers proposed a fabric defect detection method using a hybrid of CNN and VAE. The convolutional layers were employed to extract pattern features from fabric images, while the variational autoencoder was utilized to model latent characteristics and infer a reconstruction.

While a single-layer autoencoder proves effective for basic tasks, the extraction of complex features from many real-world datasets remains challenging. Addressing this limitation, a stacked autoencoder (SAE) moderates the issue by employing cascaded multiple layers of autoencoders. These layers progressively learn complex features, establishing a hierarchical representation of the data. The integration of SAE with CNN resulted in the convolutional

autoencoder stack, subsequently evolving into stacked convolutional autoencoders (SCAEs). SCAEs represent multi-layer neural networks specifically designed to capture complex representations. It is stated in [31], that SCAEs can retain more spatial locality information and extract more representative image features while minimizing redundancy, in contrast to conventional CNNs and AEs. Therefore, SCAE is rather suitable for extracting related visual perception information. Han and Yu proposed a defect detection system

using synthetic defect data based on a stacked convolutional autoencoder (SCAE) structure. Their straightforward adjustment involved utilizing autoencoders in the shape of CAE, where conventional feedforward autoencoders employ dense layers, whereas convolutional autoencoders incorporate convolutional and transposed convolutional layers [32]. Some of the recent deep learning-based studies for fabric defect detection and classification are listed in Table 1.

Table 1. Deep learning-based studies for fabric defect detection and classification.

Author	Proposed or Tested Model	AE-based [Y/N]	Dataset	Evaluation	Drawbacks
Li et al. (2023) [5]	N/A	N/A	N/A	Literature Review	Lacks specific model experimentation.
Talu et al. (2022) [6]	Fourier transform-based DPC algorithm and CNN	N	Images from their defect detection system	Classification Accuracy, Run time for one image	Utilizes traditional feature extraction but lacks unsupervised learning approaches.
Dewan et al. (2023) [13]	VGG16, Densenet, Mobilenet, Inception V3, Resnet50, Xception	N	Wang dataset	Classification Accuracy	Limited dataset size affects model performance, no custom model training is implemented.
Mohammed and Clarke (2022) [15]	U-Net, VGG16, Random Forest	N	AITEX dataset	Pixel and Classification Accuracy	Lower accuracy for certain defect classifications.
Jing et al. (2017)[17]	Modified CNN (based on a variant of AlexNet)	N	N/A	Classification Accuracy	Lacks an unsupervised learning approach.
Guo et al. (2023)[18]	AC-YOLOv5	N	Self-built fabric defect dataset	Classification Accuracy	Limited information on specific aspects like scalability and computational load.
Wang et al. (2017)[19]	Deep CNN	N	Competition dataset from the DAGM 2007 symposium	Classification Accuracy, Run time for one image	May require a larger and more diverse dataset due to complexity.
Zhou et al. (2019)[20]	VLSTM-CNN	Y	Fabric defect dataset of aliyun Tianchi competition	Classification Accuracy, Precision, Recall, F1-measure, G-mean, AUC	Relatively intricate architecture with specialized modules.
Zhao et al. (2020)[21]	FabricNet	N	Competition dataset from the DAGM 2007 symposium	Distance IoU (DIoU)	Dependency on Region Proposal Network (RPN).
Tian and Li. (2019)[24]	Autoencoder-based Method	Y	TILDA dataset	Classification Accuracy, Precision, Recall,	Iterative update approach for defect detection.
Bergmann et al. (2018)[25]	Perceptual Loss-based Model	Y	Self-built Woven fabric datasets	AUC	Lacks a comprehensive exploration of nuanced structural differences between input and reconstruction
Mei et al. (2018)[28]	Convolutional Denoising Autoencoder	Y	KTH-TIPS, Kylberg Texture, and Self-built dataset	Pixel classification Accuracy, Precision, Recall,	Computational complexity and potential sensitivity to parameter tuning.
Rippel et al. (2020) [29]	Image-to-Image Translation	N	Self-built fabric defect dataset	AUROC	Computational complexity involved in training the models
Fan et al. (2021)[30]	CNN-VAE Hybrid	Y	Patterned fabric datasets dataset from the Uni. of Hong Kong	Image Level detection rate, false alarm rate, and accuracy	Computational complexity.
Han and Yu (2020)[32]	Stacked Convolutional Autoencoders	Y	Self-built fabric defect dataset	Pixel level Precision, F1-score, Recall	Potential challenges in scalability and robustness to diverse defect types.

Throughout the training process, AEs, CAEs, and many other models for defect detection employ identical parameters such as the loss function, optimizer, batch size, and number of epochs. Autoencoders, generally structured with an Encoder-Bottleneck-Decoder architecture, serve the purpose of reconstructing the base data. Consequently, if a particular sample exhibits a significantly larger error in its output reconstruction, it may be indicative of an outlier or defect. The reconstruction error serves as a valuable metric for identifying unusual data points within a dataset. This proves particularly advantageous in unsupervised learning scenarios. In this paper, the ablation study has been conducted on CAE models which have been extensively worked on, well-received, and widely accepted in defect detection.

3 Visual inspection system configuration and the dataset

3.1 Visual inspection system

The performance of the imaging system is dependent on a combination of different elements, including the lighting, fiber material type of the fabric to be inspected for errors, the versatility of the imaging setup, and the specifications of the cameras and lenses. The layout of the developed system for visual inspection is depicted in Figure 2.

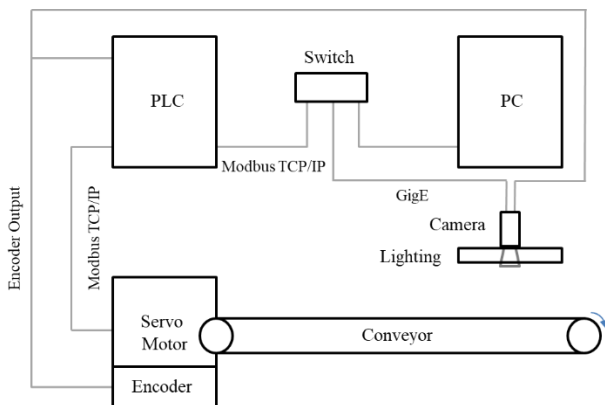


Figure 2. The layout of the developed visual inspection system.

In the developed system we used area scan cameras as the main image acquisition devices, in two distinct phases; the offline training phase and the online testing phase. Area scan cameras have been selected in visual inspection systems commonly, considering the advantages such as ease of use and affordability. On the other hand, several important limitations of area scan cameras impede the efficiency of visual inspection. For example, if the object under inspection is large, and constantly moving, or the system requires high-resolution and blur-free images, then area scan cameras are inadequate. For such problems, the use of an advanced group of cameras, namely, line scan cameras can be chosen. In cases of insufficient or blurred imaging of an object, the use of a line scan camera yields better results than area scan cameras. In this study we focus on image acquisition with

low/mid speeds of the conveyor belt and area scan cameras are utilized with ease.

To prevent under-sampling or over-sampling of the fabrics during image acquisition, a programmable encoder connected to the system is employed to synchronize the camera with the motion system and lighting. The most important factor affecting the performance of the image acquisition process for defect detection is the lighting of the environment [33]. The image acquisition process indeed is dependent on the lighting component that is dominant enough to eliminate any unwanted light reflected from the objects or environment, while also properly distributing the target areas in the image acquisition field.

The imaging process has to be done in real-time or near real-time, in industrial computer-aided visual inspection systems. Hence, a certain size of fabric regions within certain time intervals must be processed and classified. In this context, a basic requirement arises for ensuring the quick passing of the fabrics through the system for defect detection in one cycle. To meet such a requirement, it is necessary to synchronize the encoder, AC servo motor, lighting, and computer vision codes. The mechanical setup consists of solid parts mounted on the belt which can be moved to adjust the height of the camera and the lighting device. An OMRON MX2 Inverter is used for speed control of the AC servo motor. This inverter is chosen for its compliance with industrial standards and its ability to meet the required speed conditions. To obtain visual data for use in fault detection algorithms, a conveyor belt system integrated with a camera module is developed. When capturing the images, the lighting device provides a uniform ambient light. The necessary lighting equipment has been procured, and its installation has been ensured in a way that does not obstruct the flow of fabric on the conveyor belt. Cognex CAM-CIC-1300-60-G area scan camera (1.3MP, 60fps 1/1.8" CMOS sensor, C-mount, GigE) is used for offline training at the low speed of the conveyor belts. The camera is equipped with a Fujinon DF6HA-1B Lens featuring an aperture of f/1.2. A lens with such an aperture allows more light in, allowing for a faster shutter speed. To be able to describe the defects properly, a minimum defect size of 5 pixels is required. The cameras are equipped with proper lenses so that the field of view enables us to express one mm length of fabric section corresponding to a minimum of five pixels in the images. The square-shaped lighting device and the camera at the center are mounted onto the aluminum extrusion frames installed on the belt system. The triggers from the encoder on the belt are transmitted to the camera via the I/O cable thus the camera can be synchronized. The images of the system are given in Figure 3. The PC can communicate with the PLC through its Ethernet port and the speed of the band can be adjusted. Images of the fabric surface are acquired through trigger signals from the encoder. Power Over Ethernet (POE) adapters have two Ethernet connections and one power connection. The electrical energy from the power connection is transferred to the output Ethernet connection, allowing power to be

supplied to the camera through the Ethernet cable. The input Ethernet port connects to the computer, creating a local network connection between the computer and the camera in this way. The acquired images are transferred to the PC via Ethernet and presented to the defect detection algorithm to run various stages of autonomous visual inspection tasks. A desktop application capable of communicating with the camera module is created also to store the acquired images in a database.

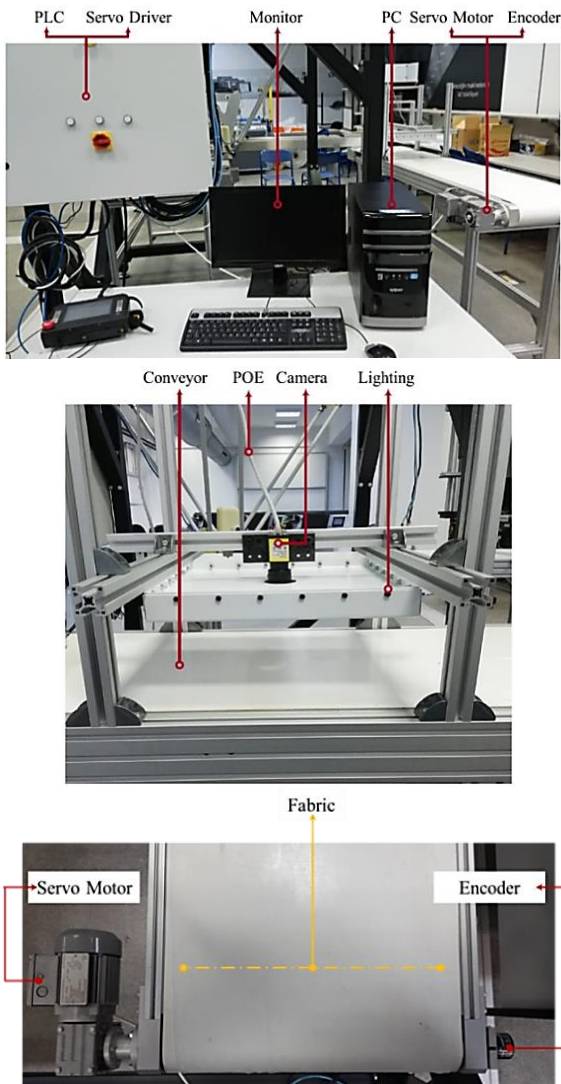


Figure 3. The complete system for visual inspection.

To ensure the recording of images during active processing and their storage in the necessary databases, ready-made interfaces do not meet the required needs. Therefore, a custom interface has been developed for the project using the SDK and developer libraries provided by Pylon Viewer. The developed interface shown in Figure 4 has been prepared using the C# language, and communication with the camera has been established using the Pylon viewer libraries. The original images have dimensions of 1280×1024, which are later cropped to 1280×704.

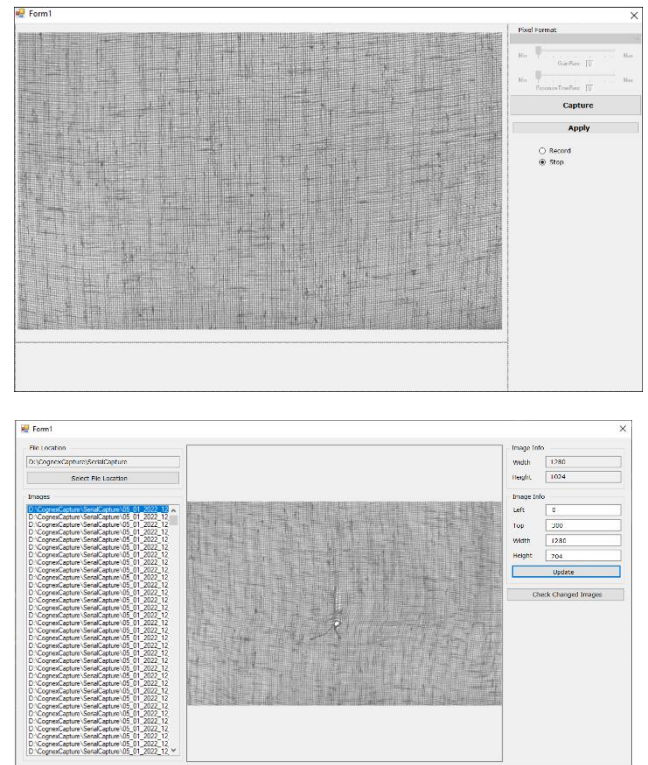


Figure 4. The interfaces for image capturing and reshaping.

3.2 The dataset

We applied the proposed system to examine tulle fabric samples containing various defects. The system captures images at a variable speed of 25.23×10^{-3} seconds per image, which equals 40 images per second. Each pixel represents a length of 3.94×10^{-3} inches, resulting in an approximate spatial resolution of 253 pixels per inch or 100 pixels per centimeter. We configured the raw image height to be 1024 pixels, meaning each image represents a 10.24 cm-length section of fabric. The fabric roll under study is 20.8 meters in length, thus, we obtained 203 non-overlapping images to cover the entire roll. The duration for shifting 1024 pixels during image acquisition is 4.35 seconds. The entire roll can be checked in 883.6 seconds (which is slow) and normally 35343 images are created. However, many of them contain excessively repeated instances of the same defects. Consequently, a set of 203 non-overlapping images is decided to be sufficient. Additionally, there are still defect-free images in this group. For defect detection and classification purposes in this study, we focused on the 58 non-overlapping images that specifically exhibit defects. Many of the fabric sample defects were intentionally produced using tools like knives, needles, etc., while others occurred during the fabric manufacturing process. The strategy for dividing large 1280×704 images into smaller 64×64 patches is depicted in Figure 5. There are 220 patches per image, totaling 12760 patches in 58 images. In the provided image in Figure 4, 17 patches exhibit defects, while 203 patches are defect-free. The patches colored in red indicate the presence of defects.

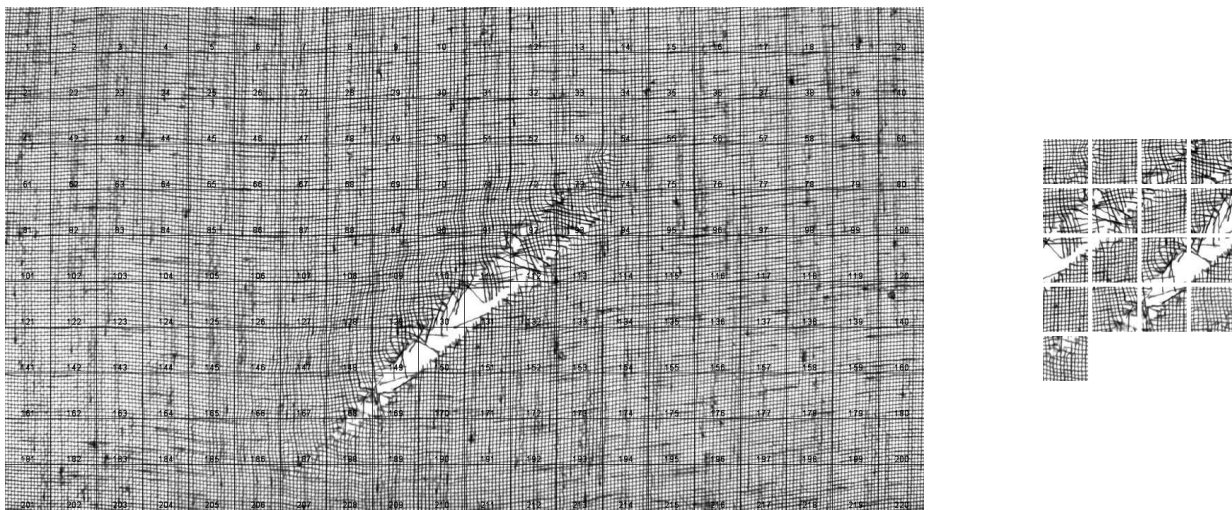


Figure 5. The strategy for dividing large 1280×704 images into smaller 64×64 patches. The numbers are overlaid on patch images and a pixel-wide boundary is added for this illustration. (The images are down-scaled to 35%)

Notably, the defect-free regions are significantly larger than the regions with defects. Out of the 12760 patches, 556 patches contain defects. 660 defect-free patches are randomly picked up and used during the training phase of the CAE model to balance the number of patches with and without defects. A defect type {hole, cut, thread wear, stain, missing thread, knots, starting mark} is assigned by an expert from the textile industry to each patch image containing a defect. The defect types adopted and used in this study are presented and exemplified in Figure 6. The patches may have different types of defects at the same time. As much as we could, labels have been assigned for the defects in all patch samples. One cannot claim that the labeling process is a definitive success because, in certain samples, multiple defect types may be present. The number of assigned labels for the defects is listed in Table 2. If such a dataset is utilized for training because three classes have a notably higher number of samples, the defect will probably be assigned to one of these classes during the defect detection.

Table 2. The number of patches having certain types of defects

Defect Types	Number of patches
Hole	38
Cut	144
Thread wear	178
Stain	4
Missing thread	20
Knots	23
Starting mark	149

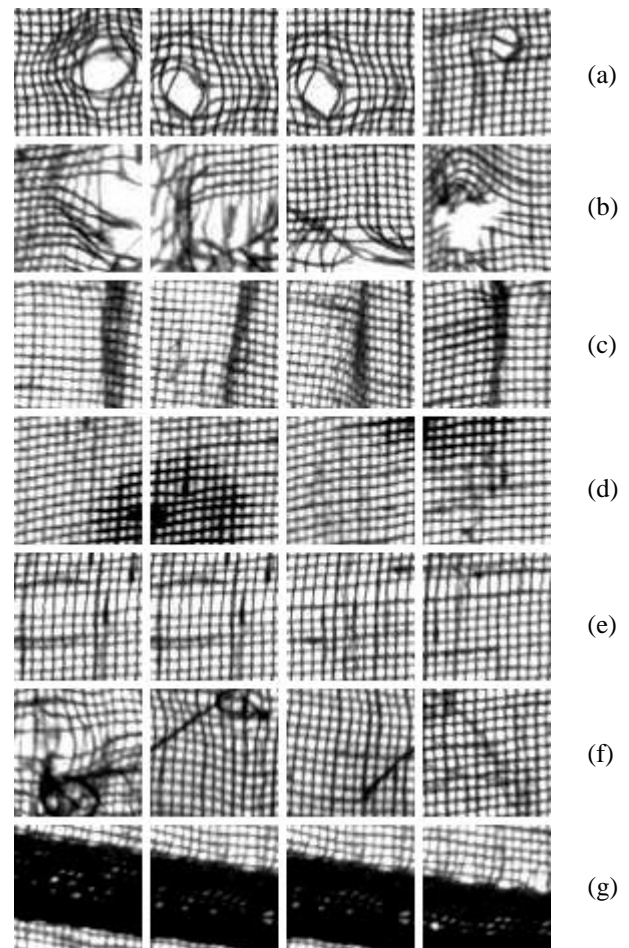


Figure 6. The defect type samples visible on the fabric used in this study: a) hole, b) cut, c) thread wear, d) stain, e) missing thread, f) knots, and g) starting mark.

4 Experimental study

It is essential to detect and categorize defects within the images. This involves a series of sequential tasks, beginning with preprocessing the fabric images, followed by

unsupervised fabric defect detection using CAE, and concluding with defect classification using a CNN model, which receives input from the feature vector generated by CAE.

The CAE model that we adopted to use both in defect detection and defect classification is given in Figure 7 and Figure 8. The structural form of the model is given as well. As can be seen from the depiction when autoencoders perform data reconstruction, it is anticipated that they will be unable to replicate noisy signals or any random elements found in the input data. This makes them suitable for distinguishing between data and noise or flaws. Specifically, this enables the identification and localization of defects within the fabric images. In this study, L_2 Loss Function is used for the training of the model to minimize the error which is the sum of all the squared differences between the original patches and the reconstructed patches. The training phase employs a standard patch-splitting strategy to reduce the number of manually labeled patches. Conversely, during the testing phase, a different but widely used approach is adopted. This involves sliding a window of the same size as the training patch images across the larger image and passing each section through the convolutional autoencoder. This enables the comprehensive testing of the larger image for defect detection, piece by piece. An alternative advanced

approach is the utilization of multi-scale convolutional autoencoders, which can handle images at various resolutions. This method entails training distinct autoencoders for different image scales. However, due to considerations of ease of implementation, multi-scale convolutional autoencoders are not currently favored in the study's current state.

Yet the error maps as the difference between the original image data and the reconstructed versions are not readily usable, various post-processing needs to be applied such as thresholding, morphological operators, and blob detection steps depicted in Figure 8. The post-processing of the reconstructed patch images holds significance in various aspects. The application of consistent post-processing techniques plays a crucial role in establishing uniformity across a set of images, thereby enhancing the reliability of comparisons and analyses. Particularly in the training of machine learning models, the preprocessing of images proves to be pivotal, exerting a substantial influence on the overall performance of the model. Keras/Tensorflow libraries are used for building, training, and testing neural network models, and the OpenCV library is used for image-based functions.

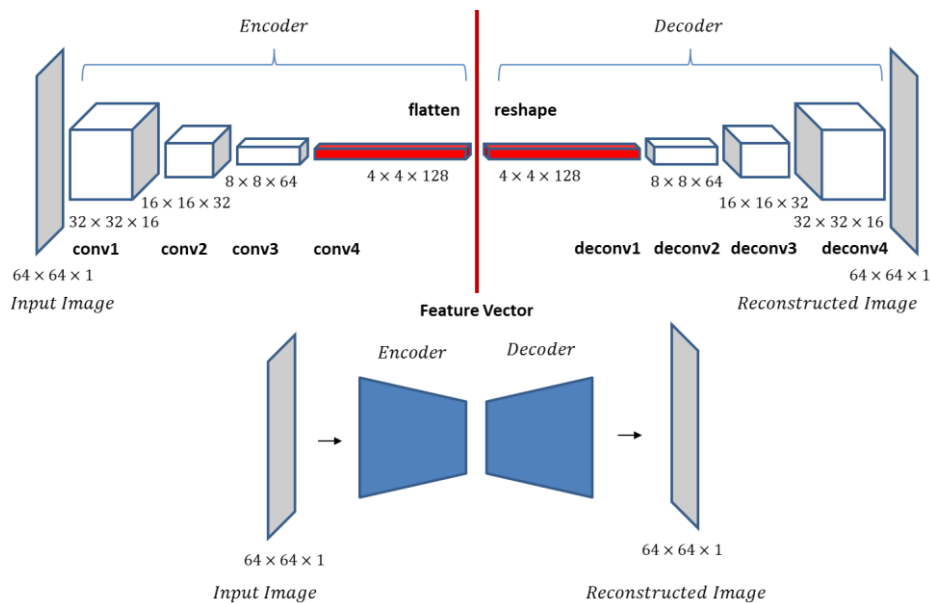


Figure 7. Defect detection: CAE model trained for defect detection using the small patch images.

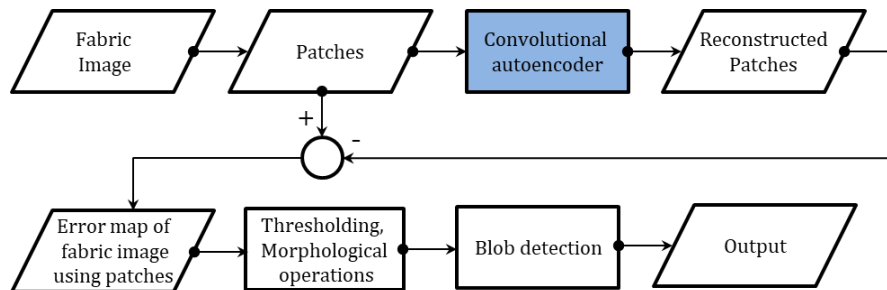


Figure 8. Computation steps of fabric defect detection – testing phase.

Figure 9-12 depict examples of defect results on various fabric images. These images showcase the following: the complete fabric images with defects, the defect detection results using CAE for the entire image, the ground truth for the defects, and an overlay that displays the defects,

detection results, and ground truth in these images. 58 images with dimensions of 1280×704 have been manually segmented using tools of ImageJ program to obtain ground truth regions for the defects used in this study.

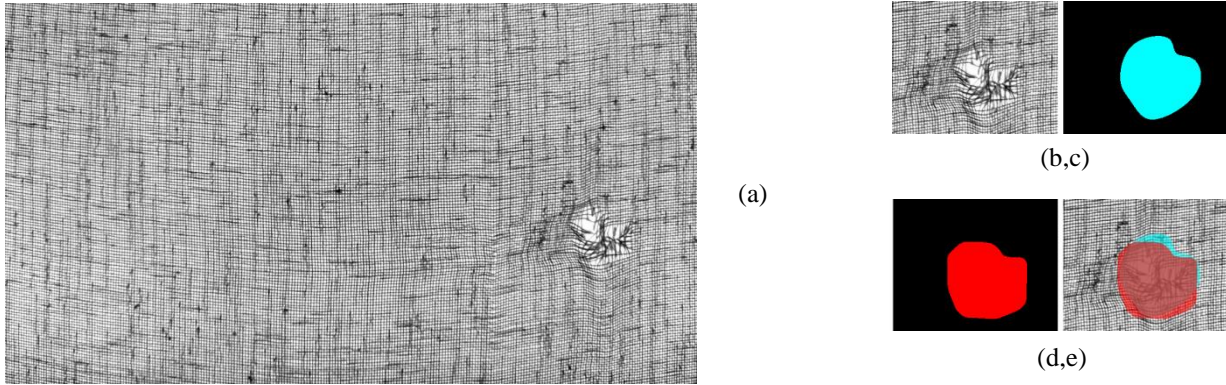


Figure 9. Defect detection result for a fabric image, a) fabric image as whole b) a patch with defect, c) defect detection result of the whole image with CAE d) the ground truth for the defect e) overlay of the defect, detection result, and the ground truth. (The images down-scaled to 30%)

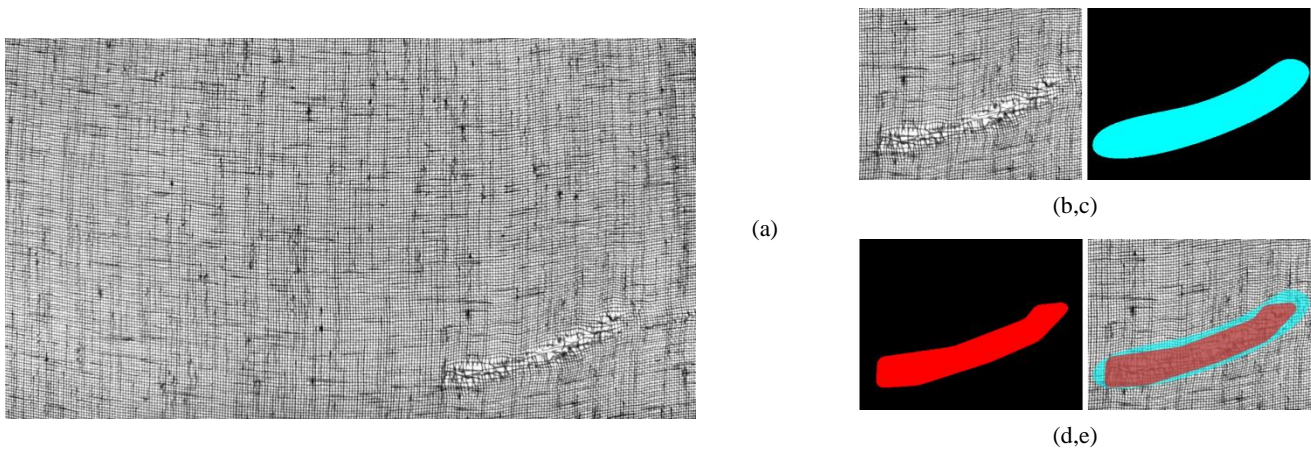


Figure 10. Defect detection result for a fabric image, a) fabric image as whole b) a patch with defect, c) defect detection result of the whole image with CAE d) the ground truth for the defect e) overlay of the defect, detection result, and the ground truth. (The images down-scaled to 30%)

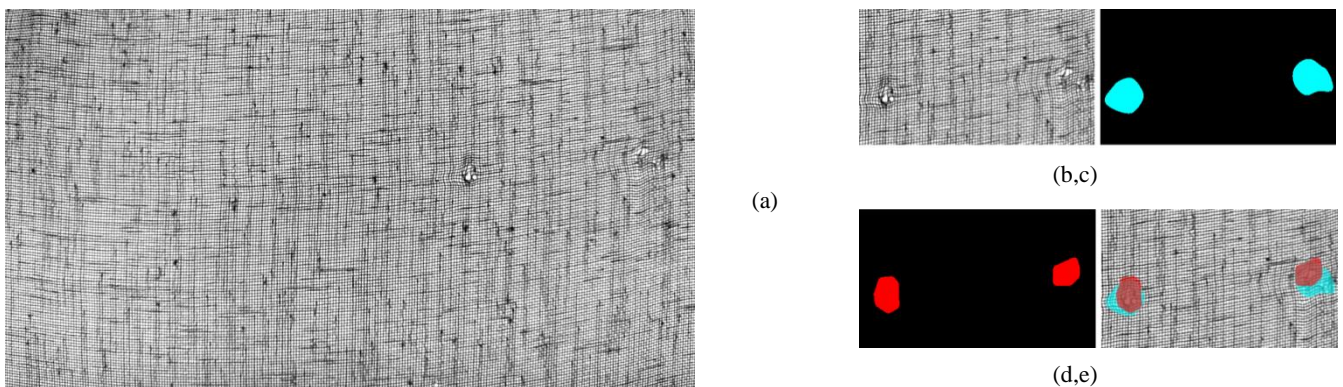


Figure 11. Defect detection result for a fabric image, a) fabric image as whole b) a patch with defect, c) defect detection result of the whole image with CAE d) the ground truth for the defect e) overlay of the defect, detection result, and the ground truth. (The images are down-scaled to 30%)

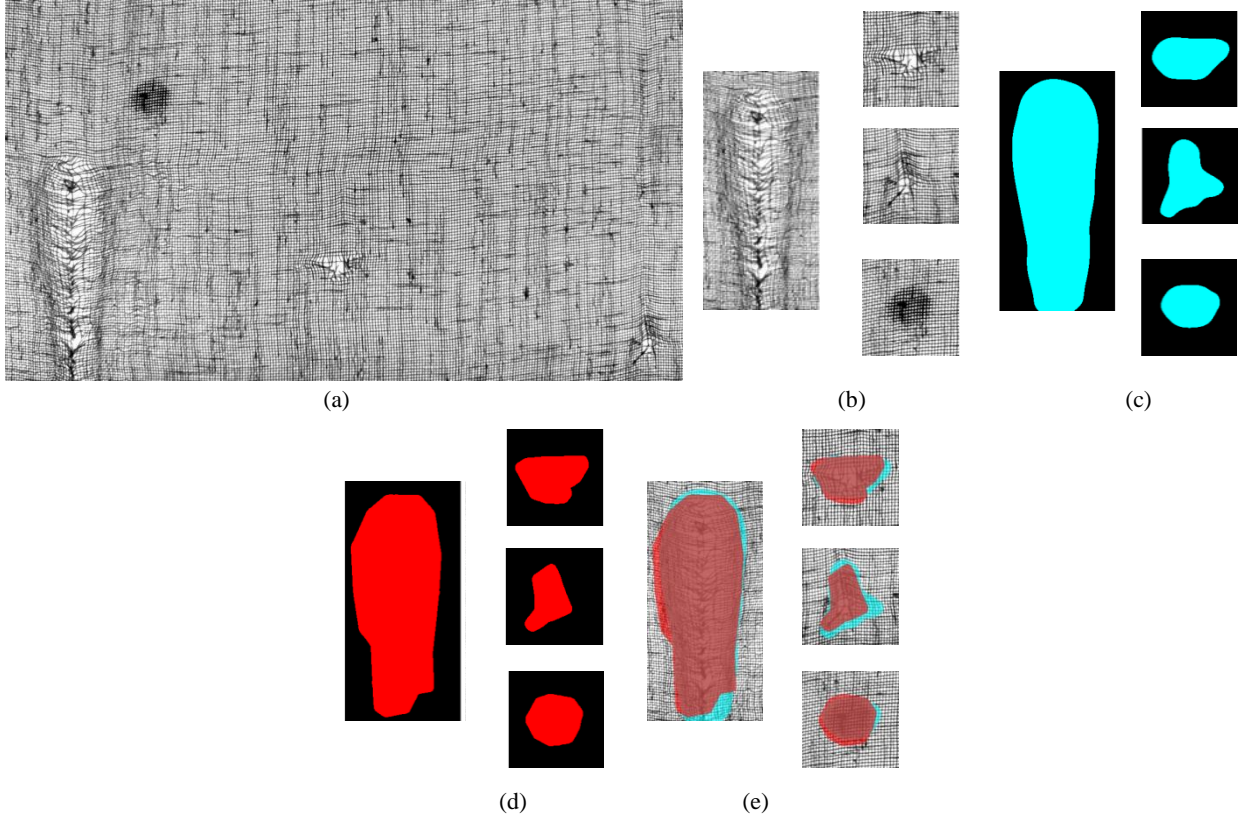


Figure 12. Defect detection result for a fabric image for multiple defects, Results for four defects are depicted a) fabric image as whole b) patches with defects, c) defect detection result of the whole image with CAE d) the ground truth for the defects e) overlay of the defects, detection results, and the ground truth.. (The images are down-scaled to 30%)

This paper places a greater emphasis on defect detection rather than defect classification. This decision is based on the recognition that, as mentioned earlier, we cannot definitively assert the success of the labeling process for the specific fabric type employed in this study. The established framework is designed to generate defect detection scores for each test image. Since all 58 images are tested collectively, overall performance scores can then be computed. These scores are derived by comparing the ground truth regions for defects with those highlighted through CAE-based defect detection. It's important to note that determining an appropriate threshold value is necessary for this process, and post-processing steps applied to candidate defective regions can inadvertently affect the scores. Following thresholding, individual pixels may be classified as either defective or defect-free. To evaluate the success of segmentation four fundamental values must be calculated. These fundamental values as true positive pixels (TP_p), false positive pixels (FP_p), false negative pixels (FN_p) and true negative pixels (TN_p). are illustrated in Figure 13.

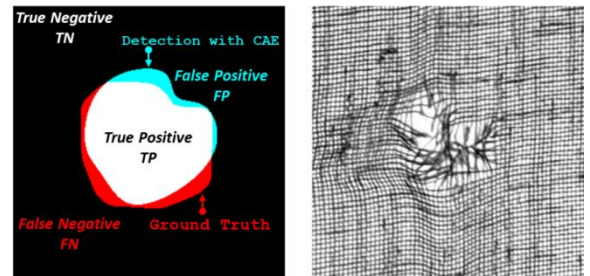


Figure 13. Categorization of image pixels. (The images are down-scaled to 75%)

A pixel labeled as defective is considered true positive. Similarly, a pixel labeled as defect-free is considered true negative. To evaluate the effectiveness of defect detection using CAE we utilize we use Recall, Precision, F1 score, Accuracy, and IoU metrics,

$$\begin{aligned}
 \text{Recall} &= TP_p / (TP_p + FN_p) \\
 \text{Precision} &= TP_p / (TP_p + FP_p) \\
 \text{F1 score} &= \\
 &= 2 \times \text{Recall} \times \text{Precision} / (\text{Recall} \\
 &\quad + \text{Precision}) \\
 \text{Accuracy} &= \\
 &= (TP_p + TN_p) / (TN_p + FN_p + TP_p + FP_p) \\
 &\quad \times 100\% \\
 \text{IoU} &= TP_p / (FP_p + TP_p + FN_p)
 \end{aligned} \tag{3}$$

Recall represents the percentage of actual defects correctly identified by the defect detection system. Precision, signifies the percentage of cases identified as defects by the detection system that are indeed actual defects. The accuracy metric quantifies the number of accurate predictions made by a model across the entire dataset. The F1 score assesses a model's performance by combining its Precision and Recall scores. IoU quantifies the degree of overlap between ground truth and result sets. The performance of the fabric defect detection using CAE for different evaluation metrics is given in Table 3.

Table 3. Performance of the fabric defect detection using CAE.

Recall	0.967
Precision	0.625
F1 score	0.760
Accuracy(%)	99.095
IoU	0.612

The Recall score primarily focuses on identifying or detecting defects, whereas the Precision score provides information about the exact location of the defects. In our experiments, the areas identified as defects by the CAE-based detection system often encompass a larger region, with the ground truth being a subset of this area, as shown in Figure 10. One possible explanation for this behavior may be the use of 64×64 patch images. When a defect is detected, it is enclosed within a larger region than necessary. As previously mentioned, several post-processing steps, such as thresholding, morphological operators, and blob detection, are required to eliminate weak candidates for defects and ensure that the defect detection framework accurately delineates the defect regions. The F1 score assesses performance using Precision and Recall scores. IoU score is proportional to the Precision score as both expressions have TP_p parameter in their numerators. If the primary concern is correctly identifying defects, Recall and Accuracy scores can be considered. Conversely, if precision in detecting defects is more important, Precision and IoU can be considered.

In defect classification, we utilize a total of 556 patch images, each has a size of 64×64 pixels. These patches exclusively contain defects. For the training dataset, we randomly select three-fourths of the patches from each defect group, reserving the remaining one-fourth for testing (Table 4). Notably, employing the patches as-is, without addressing the imbalance in sample numbers across defect classes, can lead to a classification task that inherently favors the classes with a larger sample size.

The defect classification task is employed regarding the model given in Figure 14. One can refer to the depiction of the CAE model trained for fabric defect detection using the small image patches given in Figure 6 to identify the blocks corresponding to the CAE encoder located on the right-hand side of the feature vector.

Table 4. The number of defective patch images used for the training and testing phases.

	Total	Training	Testing
Hole	38	29	9
Cut	144	108	32
Thread wear	178	120	58
Stain	4	3	1
Missing Thread	20	15	5
Knots	23	18	5
Starting mark	149	111	37
	556	404	147

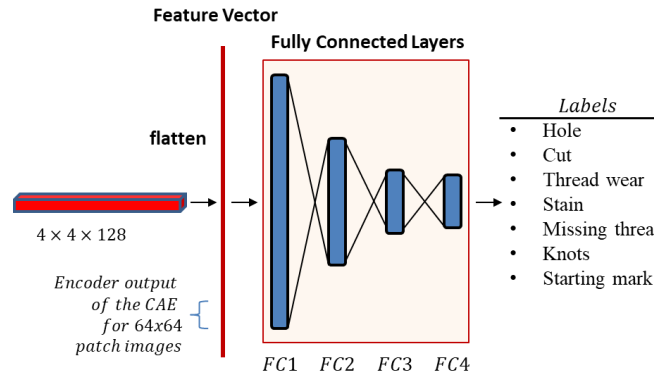


Figure 14. Defect classification: The feature vector from the encoder module already created in the patch reconstruction is to be introduced to the classifier module for the classification of the defects.

The confusion tables for the training and the test phases for the classification task are given in Figures 15 and 16 and classification rates for each class in given in Table 5.

Training \	Hole	Cut	Thread wear	Stain	Missing Thread	Knots	Starting mark
Hole	20	6	3	0	0	0	0
Cut	10	92	0	0	3	3	0
Thread wear	0	6	98	0	1	6	9
Stain	0	0	3	0	0	0	0
Missing thread	2	4	2	0	7	0	0
Knots	2	4	5	0	0	7	0
Starting mark	1	0	12	0	0	8	90

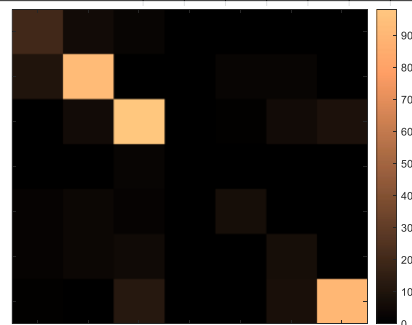


Figure 15. Confusion matrix for the training patch images.

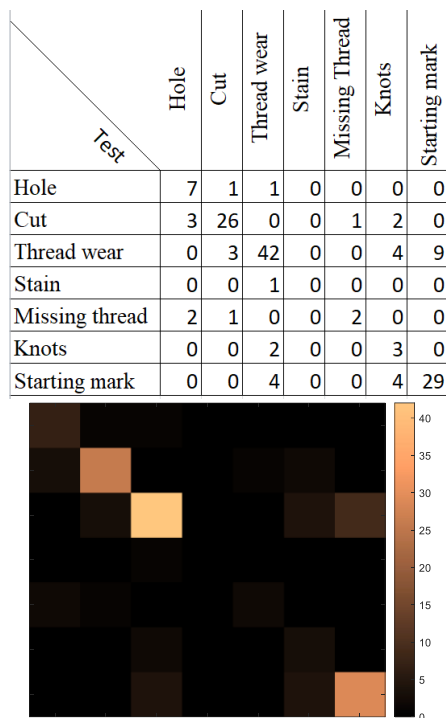


Figure 16. Confusion matrix for the test patch images.

As previously mentioned, the labeling process for the fabric types utilized in this study can pose a bottleneck for defect classification. Among the classes, there is one with an extremely limited number of samples (stain class: 3), while three other classes have only a small number of samples (missing thread: 20, knots: 23, hole: 38). In contrast, the remaining classes have a larger number of samples (cut: 144, starting mark: 149, thread wear: 178). It can be noticed that the stain class samples are misclassified mostly as thread wear (Table 5).

Table 5. Classification rates for defective patch images.

Training patch images		Test patch images	
Defect Type	Classification Rate (%)	Defect Type	Classification Rate(%)
Hole	68.97	Hole	77.78
Cut	85.18	Cut	81.25
Thread wear	81.67	Thread wear	72.41
Stain	0	Stain	0
Missing thread	46.67	Missing thread	40
Knots	38.89	Knots	60
Starting mark	81.08	Starting mark	78.38
	77.72		74.15

The class imbalance presents a challenge when training models, particularly in the context of defect detection. Neural networks may assign labels from the majority classes to the under-represented class samples, and this leads to poor generalization. Boosting algorithms are reported to be well-suited for addressing imbalanced datasets because they assign higher weights to the minority class for successive iterations [34]. Additionally, employing an appropriate evaluation metric that accounts for class imbalance can

provide a more accurate representation of a classifier's performance.

The scanning speed for the system was set to 1.412 m/min (or 0.02354 m/s), which is low for a commercial product. The main reason for this speed level is the lack of a fabric winding system associated with the inspection system. The winding process was managed mechanically at low scanning speeds. The conveyor belt can reach a speed of 8-10 m/s, yet the winding process will not support such a speed range.

The training duration of the neural network varies depending on the value desired in the loss function and the network size. In the studies conducted for fabric defect detection, the neural network was trained for an average of three hours. For defect detection, the testing duration of a test image with dimensions of 1280×704 was measured to be 5.156 seconds. For 203 non-overlapping images of 20.8 m fabric roll, overall testing was completed in 17.44 minutes. The defect classification was managed in a supervised manner utilizing the designated defective patches. The training phase of the classification took 18.50 minutes, and overall testing was completed in 7.843 seconds for 556 defective regions. All computations were evaluated on a computer with an Intel Core i7-6700HQ 2.59 GHz processor and 16.0 GB of RAM.

5 Conclusions

The main thrust of this revolved around the development of an automatic visual inspection system that utilizes deep learning to reduce the need for feature selection. The system processes large amounts of data more effectively than traditional methods in this manner. Efforts have been made to address deficiencies through the development of an autonomous visual inspection system. We investigated unsupervised fabric defect detection using CAE, and defect classification using a CNN model, which takes input as the feature vector generated by the CAE. The model constructed and trained for defect detection is developed on our tulle fabric image dataset. Additionally, we implemented a defect localization system that records data of identified defects and their respective relative locations in a database. Experimental results have demonstrated high rates of success in both defect detection and classification, affirming the applicability of our approach to real-time visual inspection systems. Regarding the scanning speed of the inspection system for the data acquisition process, the conveyor belt can operate at speeds up to 8-10 m/s. However, the current winding process does not support this speed range. Additionally, the testing duration at the current project stage is moderate. Therefore, a light version of the model with fewer parameters should be considered to remain competitive.

In the future, we will put out efforts to improve the detection accuracy and experiment with different strategies to further enhance reconstruction detail. For defect detection multi-scale convolutional autoencoders that can handle images at various resolutions and boosting algorithms to overcome the problems of imbalanced dataset use will be investigated.

Acknowledgment

This research is funded by The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) under project number 118E607.

Conflict of interest statement

There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared. There is no conflict of interest with any person/institution in the article.

Similarity rate (iThenticate): 9%

References

- [1] K. Srinivasan, P. H. Dastoor, and S. Jayaraman, FDAS: architecture and implementation. *Expert Systems*, 9, 115-124, 1992. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1468-0394.1992.tb00392.x>.
- [2] C.H. Chan and G. K. H. Pang, Fabric defect detection by Fourier analysis. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36(5), 1267-1276, 2000. <http://dx.doi.org/10.1109/28.871274>.
- [3] Standard Test Methods for Visually Inspecting and Grading Fabrics. D5430-13, 2017.
- [4] Fabric inspection systems: Agteks. <https://www.agteks.com/fabric-inspection-systems> Accessed 25 April 2024.
- [5] C. Li, J. Li, Y. Li, L. He, X. Fu, and J. Chen, Fabric defect detection in textile manufacturing: a survey of the state of the art. *Security and Communication Networks*, 1-13, 2023. <http://dx.doi.org/10.1155/2021/9948808>.
- [6] M. F. Talu, K. Hanbay, and M. H. Varjovi, CNN-based fabric defect detection system on loom fabric inspection. *Textile And Apparel*, 32(3), 208-219, 2022. <https://doi.org/10.32710/tekstilvekonfeksiyon.1032529>.
- [7] G. Gao C. Liu, Z. Liu, C. Li, and R. Yang, Fabric defect detection based on Gabor filter and tensor low-rank recovery. 4th IAPR Asian Conference on Pattern Recognition (ACPR), Nanjing, China, 2017, 73-78, 2017.
- [8] J. Chockalingam and S. Mondal, Fractal-based pattern extraction from time-Series NDVI data for feature identification. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(12), 5258-5264, December, 2017. <http://dx.doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2748989>.
- [9] K. Sakhare, A. Kulkarni, M. Kumbhakarn, N. Kare, Spectral and spatial domain approach for fabric defect detection and classification. 2015 International Conference on Industrial Instrumentation and Control (ICIC), Pune, India, 2015.
- [10] A. Bakhshipour, A. Jafari, S. Nassiri, and D. Zare, Weed segmentation using texture features extracted from wavelet sub-images. *Biosystems Engineering*, 157, 1-12, 2017. <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2017.02.002>.
- [11] J. Liang, C. Che, L. Jiuzhen, and H. Zhenjie, Fabric defect inspection based on lattice segmentation and Gabor filtering, *Neurocomputing*, 238, 84-102, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.01.039>.
- [12] Z. Ren, F. Fang, and Y. Y. Wu, State of the art in defect detection based on machine vision. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 9, 661-691 2022. <http://dx.doi.org/10.1007/s40684-021-00343-6>.
- [13] J. H. Dewan, R. Das, S. D. Thepade, H. Jadhav, N. Narsale, A. Mhasawade, and S. Nambiar, Image classification by transfer learning using pre-trained CNN models. 2023 International Conference on Recent Advances in Electrical, Electronics, Ubiquitous Communication, and Computational Intelligence (RAEEUCCI), Chennai, India, 1-6, 2023.
- [14] O. Ronneberger, P. Fischer, and T. Brox, U-net: convolutional networks for biomedical image segmentation. MICCAI 2015, Lecture Notes in Computer Science, 9351, 234-241. Springer, Cham, 2015. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1505.04597>.
- [15] S.S. Mohammed and H.G. Clarke, A hybrid machine learning approach to fabric defect detection and classification, ICECENG 2022. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, 436, 135-147, 2022. <http://dx.doi.org/10.1177/09544054231209782>.
- [16] J. Silvestre-Blanes, T. Albero-Albero, I. Miralles, R. Pérez-Llorens, and J. Moreno, A public fabric database for defect detection methods and results. *Autex Res. J.* 19(4), 363-374, 2019. <http://dx.doi.org/10.2478/aut-2019-0035>.
- [17] J. Jing, A. Dong, P. Li, and K. Zhang, Yarn-dyed fabric defect classification based on convolutional neural network. *Optical Engineering*, 56(9), 93104, 2017. <https://doi.org/10.1117/1.OE.56.9.093104>.
- [18] Y. Guo, X. Kang, J. Li, and Y. Yang, Automatic fabric defect detection method using AC-YOLOv5, *Electronics*, 2023, 12, 2950, 2023. <http://dx.doi.org/10.3390/electronics12132950>.
- [19] T. Wang, Y. Chen, M. Qiao, and H. Snoussi, A fast and robust convolutional neural network-based defect detection model in product quality control. *Int Journal of Advance Manufacturing Technology*, 94, 3465-3471, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0882-0>.
- [20] H. Zhou, B. Jang, Y. Chen, and D. Troendle, Exploring faster RCNN for fabric defect detection. Third International Conference on Artificial Intelligence for Industries (AI4I), Irvine, CA, USA, 52-55, 2020.
- [21] Y. Zhao, K. Hao, H. He, X. Tang, and B. Wei, A visual long-short-term memory based integrated CNN model for fabric defect image classification, *Neurocomputing*, 380, 259-270, 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neucom.2019.10.067>.
- [22] B. Olimov, B. Subramanian, and J. Kim, Unsupervised deep learning-based end-to-end network for anomaly detection and localization. Thirteenth International

- Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), Barcelona, Spain, 2022.
- [23] M. Sewak, S.K. Sahay, and H. Rathore, An overview of deep learning architecture of deep neural networks and autoencoders, *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 17(1), 182-188, January 2020. <http://dx.doi.org/10.1166/jctn.2020.8648>.
- [24] H. Tian and F. Li, Autoencoder-based fabric defect detection with drossp similarity. 16th International Conference on Machine Vision Applications (MVA), Tokyo, Japan, 2019.
- [25] P. Bergmann, S. Löwe, M. Fauser, D. Sattlegger, and C. Steger, Improving unsupervised defect segmentation by applying structural similarity to autoencoders. Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAP'13), Madeira Portugal, 27-29 Jan 2018.
- [26] E. Solovyeva and A. Abdullah, Dual autoencoder network with separable convolutional layers for denoising and deblurring Images. *Journal of Imaging*, 8(9), 250, 2022. <https://doi.org/10.3390/jimaging8090250>.
- [27] S. Mei, Y. Wang, and G. Wen Automatic fabric defect detection with a multi-scale convolutional denoising autoencoder network model, *Sensors*, 18, 1064, 2018. <https://doi.org/10.3390/s18041064>.
- [28] O. Rippel M. Müller, and D. Merhof, GAN-based defect dynthesis for anomaly setection in fabrics. 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Vienna, Austria, 2020.
- [29] I. Goodfellow, J. Pouget-Abadie, M. Mirza, B. Xu, D. Warde-Farley, S. Ozair, A. Courville, and Y. Bengio, Generative adversarial nets, *advances in neural information processing systems*. 3(6), 2014. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1406.2661>.
- [30] J. Fan, W. K. Wong, J. Wen, C. Gao, D. Mo, and Z. Lai, Fabric defect detection using deep convolution neural network. *AATCC Journal of Research*, 8 (1_suppl),143-150, 2021. <https://doi.org/10.14504/ajr.8.S1.18>.
- [31] J. Masci, U. Meier, D. Cire, and J. Schmidhuber, Stacked convolutional auto-encoders for hierarchical feature extraction. *Proceedings of the International Conference on Artificial Neural Networks*, Springer, pp. 52–59, 2011.
- [32] Y. J. Han and H. J. Yu, Fabric defect detection system using stacked convolutional denoising auto-encoders trained with synthetic defect data. *Applied Sciences*, 10(7), 2511, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10072511>.
- [33] C. C. Chen, C.H. We, and C.S. Lin, Fast detection of fabric defects based on neural networks. Sixth International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C), Taichung, Taiwan, 2023.
- [34] A. Taherkhani, C. Georgina, T. McGinnity, AdaBoost-CNN: an adaptive boosting algorithm for convolutional neural networks to classify multi-class imbalanced datasets using transfer learning. *Neurocomputing*, 404, 351-366, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.03.064>.





Eskişehir'de hava kirliliği: PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂ konsantrasyonlarının mekânsal-zamansal değişimi ve kaynaklarının değerlendirilmesi

Air pollution in Eskişehir: Spatio-temporal variation of PM₁₀, PM_{2.5}, and SO₂ concentrations and evaluation of sources

İlker Balcılar^{1,*} 

¹ Eskişehir Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 26555, Eskişehir Türkiye

Öz

Bir bölgedeki hava kalitesine etki eden kaynakların ve katkılarının belirlenmesi etkin kontrol stratejilerinin geliştirilmesi için büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, Eskişehir'deki üç farklı istasyondan elde edilen PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂ verileri 2023 yılı için incelenmiştir. Tüm istasyonlarda, PM₁₀ ve PM_{2.5} konsantrasyonlarının Dünya Sağlık Örgütü tarafından önerilen sınır değerlerin üzerinde olduğu belirlenmiştir. Kirleticilerin zamansal ve mekânsal değişimleri ile iki değişkenli polar grafikleri incelendiğinde, İstasyon 1'de trafik ve evsel ısınmanın tüm kirleticiler üzerinde yüksek katkısı gözlenmiştir. İstasyon 2'de ise trafik ve ısınmanın kirleticiler üzerindeki katkıları farklılık göstermiştir. İstasyon 3'te ise SO₂ ve PM_{2.5} üzerinde antropojenik kaynaklar daha etkili olurken, PM₁₀'da toprak emisyonlarının etkisi de gözlenmiştir. PM₁₀ için konsantrasyon ağırlıklı yörünge modeli, Türkiye'de İç Anadolu ve Ege bölgeleri ile Yunanistan üzerindeki bölgeleri önemli katkı sağlayan bölgeler olarak belirlemiştir.

Anahtar kelimeler: Mevsimsel değişim, İki değişkenli polar grafik, Konsantrasyon ağırlıklı yörünge

1 Giriş

Kentleşme ve hızlı sanayileşme, yaşam standartlarının yükselmesi ve teknolojik kabiliyetlerin artması gibi bir dizi faydayı beraberinde getirmiş olsa da birçok olumsuz sonuca da yol açmıştır. Bu sonuçlardan en önemlilerinden biri de hava kirliliği problemidir. Kentsel hava kirliliği, hem doğal hem de antropojenik kaynaklardan etkilenen çok yönlü bir sorundur [1]. Volkanik patlamalar, orman yangınları ve toz taşınımı gibi doğal kaynaklar kentsel hava kirliliğine katkıda bulunurken, antropojenik faaliyetler bu sorunu önemli ölçüde şiddetlendirmektedir [2]. Ulaşım, fosil yakıtların evsel ısınmada kullanımı, sanayileşme, enerji üretimi, yanma ve tarım gibi antropojenik faktörler kentsel hava kirliliğine başlıca katkıda bulunan unsurlardır [3]. Bu kaynaklardan salınan emisyonlar sonucu dünyanın birçok kentinde hava kirliliği insan sağlığını tehdit eden önemli bir problem haline gelmiştir. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), dünya nüfusunun %99'unun DSÖ tarafından önerilen hava kalitesi sınır değerlerinin karşılanmadığı yerlerde yaşadığını belirtmektedir [4]. Dünyanın birçok kentinde olduğu gibi

Abstract

Determining the sources and their contributions to air quality in a region is of great importance for the development of effective control strategies. In this study, PM₁₀, PM_{2.5}, and SO₂ data obtained from three different stations in Eskişehir were analyzed for 2023. At all stations, PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations exceeded the limit values recommended by the World Health Organization. Analysis of temporal and spatial variations in pollutants, along with bivariate polar plots, revealed that traffic and residential heating have high contribution on all pollutants at Station 1. At Station 2, the contributions of traffic and residential heating to pollutants differed. At Station 3, anthropogenic sources were more effective for SO₂ and PM_{2.5}, while contribution of soil emissions was also observed for PM₁₀. For PM₁₀, the concentration weighted trajectory model identified the Central Anatolia and Aegean regions in Türkiye, as well as regions over Greece, as significant source regions.

Keywords: Seasonal variation, Bivariate polar plot, Concentration weighted trajectory

Türkiye'de de hava kirliliği ile ilgili yapılan çalışmalar hava kirliliğinin özellikle kentlerde önemli bir problem olduğunu göstermektedir [5-7].

Hem doğal hem de antropojenik kaynaklardan salınan başlıca emisyonların arasında PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂ de yer almaktadır. Bu kirleticiler, ABD Çevre Koruma Ajansı tarafından insan sağlığı ve ekosistem üzerindeki zararlı etkilerinden dolayı atmosferdeki seviyelerinin kontrol edilmesi gereken 6 öncelikli kirleticiler arasında yer almaktadır [8]. Partikül madde (PM) olarak bilinen havadaki partiküller, boyutlarına göre sınıflandırılır. PM₁₀, çapı 10 mikrometre veya daha küçük olan partikülleri ifade ederken, PM_{2.5}, çapı 2.5 mikrometre veya daha küçük olan partikülleri ifade eder. SO₂, sülfür içeren fosil yakıtların yanmasıyla ortaya çıkan bir gazdır. Bu kirleticilerin endüstriyel faaliyetler, ulaşım ve biyokütle yanması dahil olmak üzere çeşitli kaynakları vardır [9, 10] ve kömür yanması SO₂ emisyonlarına önemli katkıda bulunur [11].

PM₁₀ ve PM_{2.5}, solunum ve kardiyovasküler hastalıklar gibi çeşitli sağlık sorunları ve artan ölüm oranları ile

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ilkerbalcilar@eskisehir.edu.tr (İ. Balcılar)
Geliş / Received: 27.03.2024 Kabul / Accepted: 10.07.2024 Yayımlanma / Published: 15.10.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1459990

ilişkilendirilmiştir [12, 13]. SO₂ emisyonları partikül madde oluşumuna katkıda bulunmakta ve solunum ve kardiyovasküler sorunlarla ilişkilidir [14]. Çalışmalar, bu kirleticilere maruz kalmanın halk sağlığı üzerindeki ciddi sonuçlarını ortaya koymuş ve atmosferdeki seviyelerinin izlenmesi ve kontrol edilmesinin önemini vurgulamıştır [15, 16]. Özellikle, COVID-19 ile farklı parametreler arasında korelasyonun olduğuna [17] ve ayrıca NO₂'nin mortaliteye atfedilecek etkisi de dikkat çekilmiştir [18].

Araştırmalar, PM ve SO₂ seviyelerinin meteoroloji, mevsimsellik ve insan faaliyetleri gibi çeşitli faktörlerden etkilendiğini ve mekânsal ve zamansal değişikliklere uğradığını göstermiştir. Özellikle PM_{2.5} konsantrasyonlarının zaman içinde farklılıklar gösterdiği ve SO₂ konsantrasyonları ile pozitif korelasyon gösterdiği tespit edilmiştir [8]. PM_{2.5}'te mevsimsel değişimler gözlemlenmiş ve benzer şekilde günlük değişimler de kaydedilmiştir [19]. Molepo vd. [20] PM₁₀'un günlük değişiminin SO₂ ve NO_x'e benzer olduğu ancak O₃'ten farklı olarak sabahları pik yaptığını belirtmiştir. Barhoumi vd. [21] SO₂ konsantrasyonlarındaki mevsimsel değişimlerin meteorolojik koşullara ve emisyon kaynaklarına bağlı olduğunu; kış ve sonbaharda daha yüksek, ilkbahar ve yaz aylarında ise daha düşük seviyelerde olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, Xu vd. [22] PM_{2.5} ve PM₁₀'un değişimlerinde gündüz/gece döngülerini varlığını ve günün farklı saatlerinde farklı konsantrasyonların gözlemlendiğini doğrulamıştır. Xue vd. [23] NO₂ ve SO₂'nin belirli bölgelerdeki mekânsal ve zamansal değişimlerini izleyerek farklı yıllardaki dalgalanmaları göstermiştir. Son olarak, yapılan başka bir çalışmada COVID-19 karantinalarının hava kalitesi üzerindeki etkisi sunulmuş, bununla birlikte yağış gibi meteorolojik faktörlerden etkilenen PM₁₀ ve PM_{2.5} konsantrasyonlarının mevsimsel farklılıklar gösterdiği ortaya konmuştur [24].

Türkiye'nin İç Anadolu Bölgesi'nde yer alan Eskişehir, yoğun nüfusunun yanı sıra Türkiye'nin 10. büyük sanayi bölgesine ev sahipliği yapmaktadır. Ayrıca, lojistik ve yolcu taşımacılığı açısından yoğun bir trafiğe sahip olan Ankara-Bursa D200 karayolu, Eskişehir şehir merkezinden geçmektedir. Eskişehir'de daha önce yapılan çalışmalar, kentleşme, yoğun trafik ve sanayi faaliyetleri nedeniyle kentin yüksek düzeyde hava kirliliği ile karşı karşıya olduğunu göstermiştir [25-27]. Geçmişte yapılan bu çalışmalarda, uçucu organik bileşikler, PAH'lar, PM, SO₂, NO₂ ve O₃ gibi kirleticiler Eskişehir'in hava kirliliğine katkıda bulunan önemli unsurlar olarak tespit edilmiştir. Ancak, Eskişehir'in hava kalitesine ilişkin mevcut çalışmalarda bazı eksiklikler bulunmaktadır. İlk olarak, PM_{2.5}'in zamansal ve mekânsal değişimine ilişkin daha önce bir analiz yapılmamıştır. Diğer bir önemli eksik ise bölgede kaynak türlerinin ve katkılarının etkin bir şekilde değerlendirilmesine yönelik reseptör modellemesi yöntemlerine başvurulmamış olmasıdır.

Bu çalışmada, Eskişehir il merkezinde Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağında yer alan üç farklı istasyonda ölçülen PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂ konsantrasyonları kullanılarak kirleticilerin zamansal ve mekânsal değişimlerini incelemek, reseptör modellemesi yöntemleriyle bu istasyonlardaki

kaynak etkilerinin benzerliklerini ve farklılıklarını belirlemek ve uzun mesafeli taşınımın hava kalitesine etkisini tespit etmek amaçlanmıştır. Bahsedilen bu analizler çalışmanın özgün noktalarını oluşturmaktadır.

2 Materyal ve metod

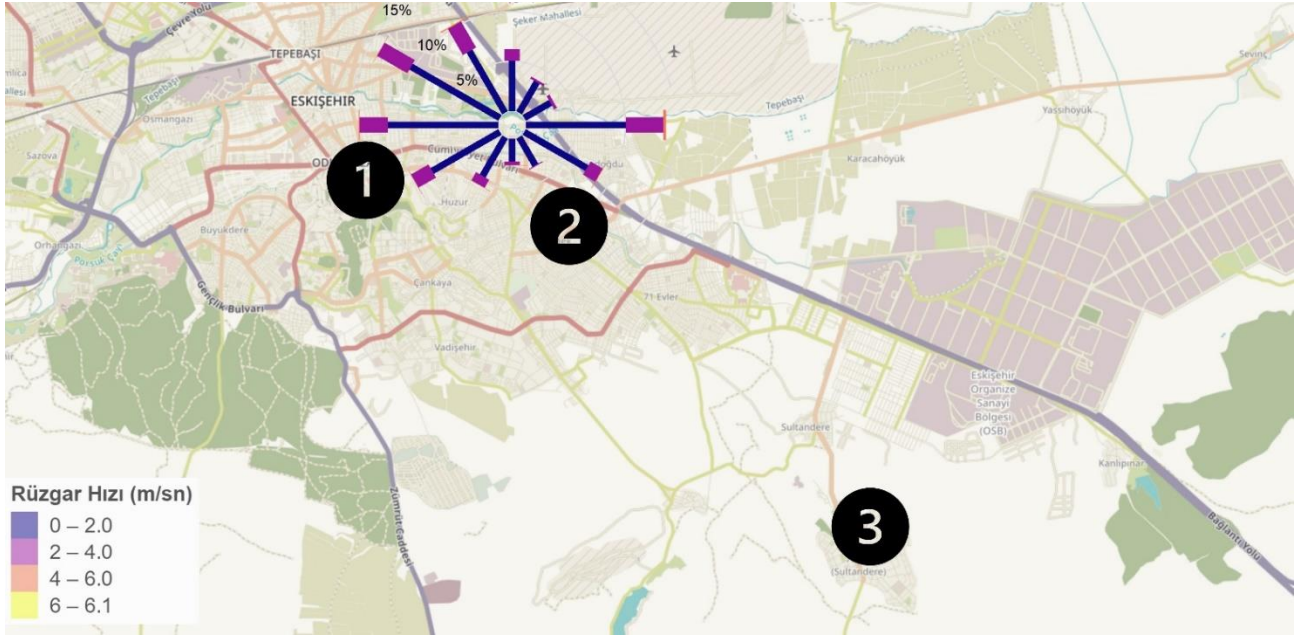
2.1 Hava kalitesi istasyonları ve istasyon verileri

İç Anadolu Bölgesi'nin kuzeybatısında, 29°-32° doğu boylamları ile 39°-40° kuzey enlemleri arasında yer alan Eskişehir'in yüzölçümü 13653 km² ve il merkezinin denizden yüksekliği 792 metredir [28]. Eskişehir il merkezinin 2023 yılı TÜİK verilerine göre nüfusu 915418 kişidir [29]. 2020 yılında Eskişehir'in en önemli ekonomik gelirini %54'lük pay ile hizmetler oluştururken, sanayi ve tarım sektörlerinin katkıları ise sırasıyla %39 ve %7 olmuştur [30]. 32 milyon m²'lik alanda kurulu Eskişehir Organize Sanayi Bölgesi, şehir merkezinin doğu yönünde 10 km mesafede yer almaktadır ve sanayi işletmelerinin sektörlere göre dağılımı şu şekildedir: makine ve ekipmanlar için % 13.6; gıda ürünleri için % 11.6; metal ürünleri için % 11 ve elektrik, gaz, buhar için % 10.5 [30, 31].

Eskişehir il merkezinde Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığına bağlı Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı (UHKİA) kapsamında 5 adet hava kalitesi ölçüm istasyonu bulunmaktadır. Bu istasyonlardan ikisi trafik, ikisi ısınma ve bir tanesi ise sanayi kaynaklı kirleticileri izlemek için kullanılmaktadır. Eskişehir il merkezinde kirleticilerin mekânsal ve zamansal değişimlerinin incelenmesi amacıyla, tüm istasyonlar hem ölçülen kirletici türleri hem de kirleticilerin ölçüm yüzdeleri açısından değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sonucunda, her istasyon türünden birer adet olmak üzere toplamda üç istasyon seçilmiştir. İstasyon 1, Cumhuriyet Bulvarı üzerinde (39.7665 30.5259) yer almakta olup istasyon türü trafiktir. İstasyon 2, Odunpazarı semt merkezinde bir okul bahçesinde (39.7577 30.5639) yer almaktadır ve istasyon türü ise ısınmadır. İstasyon 3 ise Organize Sanayi Bölgesine (OSB) yakın bir konumda (39.7156 30.6175), yarı kırsal bir bölgede kuruludur ve istasyon türü ise sanayidir. İstasyon 1, 2 ve 3'ün harita üzerindeki konumları ve Eskişehir il merkezinde rüzgâr yönlerine göre esme sıklıklarını ve hızlarını gösteren rüzgâr gülü Şekil 1'de verilmiştir. Seçilen istasyonlardaki PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂ için 01 Ocak 2023 – 31 Aralık 2023 tarihleri arasındaki saatlik ölçüm verileri UHKİA portalı [32] kullanılarak temin edilmiştir.

2.2 İki değişkenli polar grafik

İki değişkenli polar grafikler, emisyon kaynakları hakkında yön bilgisi sağladığından ve konsantrasyonların rüzgâr hızına göre nasıl değiştiğini gösterdiğinden, belirli bir kirleticinin konsantrasyonunu hem rüzgâr hızı hem de yönü ile ilişkili olarak analiz etmek için etkili bir araçtır [33, 34]. Bu grafikler, grafiksel analiz yoluyla atmosferik kirleticilerin potansiyel emisyon kaynaklarının belirlenmesinde [35] ve kirletici konsantrasyonunun kutupsal koordinatlarda rüzgâr yönü ve hızı ile nasıl değiştiğini etkili bir şekilde göstererek farklı emisyon kaynakları arasında ayırım yapılmasına yardımcı olurlar [36].



Şekil 1. Hava kalitesi izleme istasyonları ve Eskişehir'in 2023 yılına ait rüzgâr gülü

İki değişkenli polar grafikleri oluşturmak için rüzgâr hızı, rüzgâr yönü ve konsantrasyon verileri rüzgâr hızı yönü kutuplarına bölünür ve her kutup için ortalama konsantrasyon hesaplanır [37].

Bu değerler daha sonra rüzgârın u ve v bileşenlerini kullanarak bir konsantrasyon yüzeyi oluşturmak için kullanılır. İlk olarak rüzgârın u ve v bileşenleri Denklem 1 ile hesaplanır; burada \bar{u} ortalama rüzgâr hızını, Θ ise 90 derece doğu olmak üzere derece cinsinden ortalama rüzgâr yönünü temsil eder.

$$u = \bar{u} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\Theta}\right), v = \bar{u} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\Theta}\right) \quad (1)$$

Rüzgârın u ve v bileşenleri ile kirletici konsantrasyon verileri kullanılarak Genelleştirilmiş Eklemeli Modeli (GAM) [38] yardımıyla konsantrasyon yüzeyi Denklem 2'ye göre oluşturulur; burada C_i kirletici konsantrasyonu, β_0 yanıtın genel ortalamasını, $s(u_i, v_i)$ u ve v ortak değişkenlerinin i 'nci değerinin düzleştirme fonksiyonunu, ε_i i 'nci artık değerini temsil eder.

$$\sqrt{C_i} = \beta_0 + s(u_i, v_i) + \varepsilon_i \quad (2)$$

PM_{10} , $PM_{2.5}$ ve SO_2 'nin iki değişkenli polar grafikleri RStudio® yazılımında "OpenAir" paketi [39] kullanılarak oluşturulmuştur. Bu analiz için meteorolojik veriler Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından sağlanmıştır.

2.3 Konsantrasyon ağırlıklı yörünge modeli

Geri yörünge istatistiği yöntemleri ölçülen kirletici konsantrasyonları ile birleştirildiğinde kaynak-reseptör ilişkisi kurarak atmosferik taşınımın kirleticiler üzerindeki etkisinin incelenmesine olanak sağlamaktadır. Bir geri yörünge istatistiği yöntemi olan konsantrasyon ağırlıklı

yörünge (CWT) modeli, kirleticilerin atmosferik taşınım yollarını ve potansiyel kaynak bölgelerini analiz etmek için kullanılır. CWT modeli uygulanarak, ölçülen kirletici konsantrasyonlarını etki eden potansiyel kaynak bölgeleri belirlenebildiği gibi potansiyel kaynak katkı fonksiyonu (PSCF) yönteminden farklı olarak bu bölgelerin gözlemlenen kirletici seviyelerine göreceli katkıları da belirlenebilmektedir [40].

CWT modelinde kullanılan geri yörüngeler 72 saat uzunluğunda ve 500 m geliş yüksekliğinde 01 Ocak 2023 – 31 Aralık 2023 tarihleri için günlük olarak bir CBS yazılımı olan MeteoInfo [41] kullanılarak hesaplanmıştır. MeteoInfo yazılımı geri yörüngeleri HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) modelini kullanarak hesaplamaktadır. CWT modelinde kullanılan çalışma alanı, geri yörüngelerin uzunluğunu da kapsayacak şekilde doğu-batı yönünde -15° ve 50° boylamları ile güney-kuzey yönünde 26° ve 72° enlemleri arasındaki bölgeyi kapsamaktadır. Bu çalışma alanı daha sonra $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ grid hücrelerine bölünmüştür. CWT modelinde, her bir grid hücresine, o hücreden geçen yörüngelerle ilişkili ortalama örnek konsantrasyonlarına dayalı olarak ağırlıklı bir konsantrasyon atanır [42]. Her bir grid hücresinin ortalama ağırlıklı konsantrasyon değeri Denklem 3 ile hesaplanır.

$$C_{ij} = \frac{1}{\sum_{l=1}^M \tau_{ijl}} \sum_{l=1}^M C_l \tau_{ijl} \quad (3)$$

Burada C_{ij} ij 'inci hücredeki ortalama ağırlıklı konsantrasyonunu, l yörüngesinin indeksini, M toplam yörünge sayısını, C_l l yörüngesinin varışında gözlemlenen konsantrasyonu ve τ_{ijl} l yörüngesinin ij 'inci hücrede geçirdiği süreyi gösterir.

Her bir grid hücresi için hesaplanan ortalama ağırlıklı konsantrasyon değeri daha sonra Tang vd. [43] tarafından belirtilen metoda göre ağırlıklandırılmıştır ve haritanın görselleştirilmesinde bu ağırlıklandırılmış değerler kullanılmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

1 Ocak 2023 – 31 Aralık 2023 tarihleri arasında İstasyon 1, 2 ve 3'te ölçülen PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂ konsantrasyonlarının istatistiksel değerleri (ortalama, standart sapma, ortanca, minimum, maksimum) Tablo 1'de yer almaktadır. PM₁₀ için en yüksek ortalama konsantrasyon, trafiğin ve yerleşimin yoğun olduğu bir bölgede kurulu olan İstasyon 1'de 48.5 ± 32.1 µg/m³ olarak kaydedilmiştir. İstasyon 2 ve 3'te PM₁₀ ortalama değerleri sırasıyla 42.7 ± 28.9 µg/m³ ve 23.1 ± 17 µg/m³ olarak kaydedilmiştir. Daha önce de değinildiği gibi, İstasyon 2, yerleşimin yoğun olduğu ancak trafiğin yoğun olduğu yollara İstasyon 1'e kıyasla daha uzak bir lokasyonda bulunmaktadır. İstasyon 3 ise şehir merkezinden uzak ve yerleşimin daha az yoğun olduğu Organize Sanayi Bölgesinde kuruludur. İstasyonların konumlarındaki bu bölgesel farklılıkların, PM₁₀ seviyeleri üzerinde etkili olduğu görülmektedir. PM_{2.5} için en yüksek ortalama konsantrasyon 25.4 ± 19.3 µg/m³ ile İstasyon 1'de kaydedilirken, İstasyon 2'de ortalama değer 9.6 ± 11.7 µg/m³, İstasyon 3'te ise 6.7 ± 6.4 µg/m³ olarak kaydedilmiştir. PM₁₀'a benzer şekilde, PM_{2.5}'te de bölgesel farklılıklar belirleyici olmaktadır. SO₂ için de diğer kirleticilerde olduğu gibi en yüksek ortalama konsantrasyon İstasyon 1'de 7.4 ± 8.1 µg/m³ olarak kaydedilmiştir. İstasyon 2 ve 3 için ise ortalama konsantrasyonlar sırasıyla 5.7 ± 4.5 µg/m³ ve 5.2 ± 4.9 µg/m³ olarak kaydedilmiştir.

Tablo 1. İstasyon 1, 2 ve 3'te PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂ için ölçülen konsantrasyonların istatistiksel değerleri (µg/m³)

İstasyon 1	Ort. ± SS	Ortanca	Minimum	Maksimum
PM ₁₀	48.5 ± 32.1	40.7	2.1	411.5
PM _{2.5}	25.4 ± 19.3	20.9	0.3	240.0
SO ₂	7.4 ± 8.1	4.7	0.6	128.6
İstasyon 2	Ort. ± SS	Ortanca	Minimum	Maksimum
PM ₁₀	42.7 ± 28.9	36.7	0.5	314.1
PM _{2.5}	9.6 ± 11.7	5.2	0.01	142.9
SO ₂	5.7 ± 4.5	4.2	0.9	57.1
İstasyon 3	Ort. ± SS	Ortanca	Minimum	Maksimum
PM ₁₀	23.1 ± 17	19	0.1	191.6
PM _{2.5}	6.7 ± 6.4	5.2	0.01	114.2
SO ₂	5.2 ± 4.9	4.1	0.9	78.0

DSÖ [4] tarafından PM₁₀ için yıllık ortalama sınır değeri 15 µg/m³ olarak önerilmektedir. DSÖ tarafından önerilen bu yıllık sınır değerin 2023 yılında tüm istasyonlarda aşıldığı gözlenmiştir. İstasyon 1'de PM₁₀'un yıllık ortalama konsantrasyonu önerilen sınır değerinin 3 katından fazla kaydedilmiştir. İstasyon 2'de 3 katına yakına yakın, istasyon 3'te ise 1.5 katından fazla gözlenmiştir. PM₁₀ için ülkemizde [44] ve Avrupa Birliği'nde (AB) [45] belirlenen yıllık ortalama değerler 40 µg/m³'tür. Bu sınır değerinin ülkemiz mevzuatlarına göre İstasyon 1 ve İstasyon 2'de aşıldığı

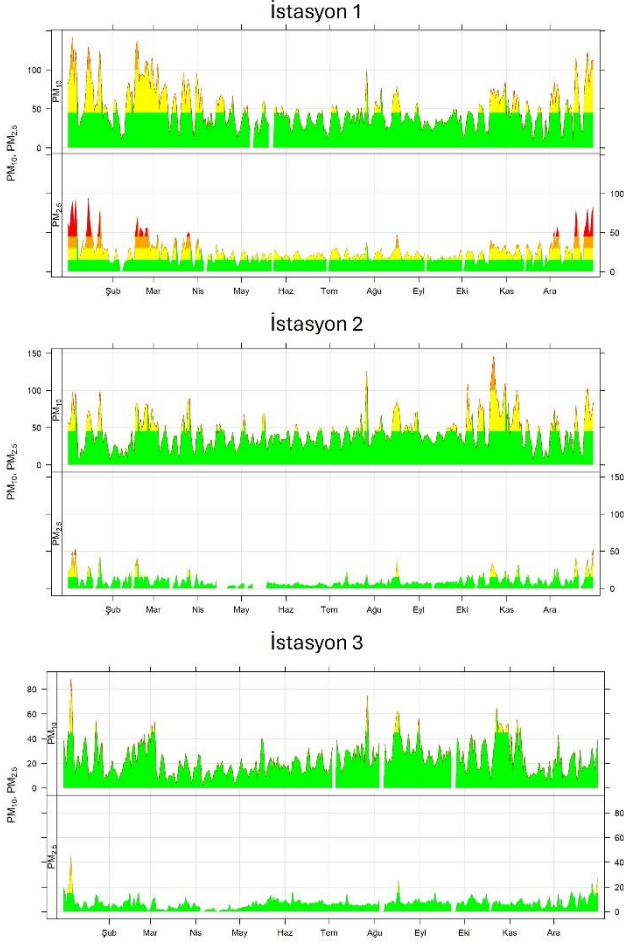
gözlenirken, İstasyon 3'te sınır değeri aşılmamıştır. PM_{2.5} için DSÖ tarafından önerilen yıllık ortalama sınır değeri 5 µg/m³'tür [4]. Bu sınır değeri yine PM₁₀'da olduğu gibi tüm istasyonlarda PM_{2.5} için de aşıldığı gözlenmiştir. Özellikle istasyon 1'de PM_{2.5} ortalama konsantrasyonu 5 kat fazla kaydedilmiştir. PM_{2.5} için ülkemizde bir sınır değeri belirlenmemiştir, ancak AB tarafından belirlenen yıllık sınır değeri 20 µg/m³'tür [45]. AB tarafından belirlenen sınır değeri, sadece İstasyon 1'de aşıldığı gözlemlenmiştir. DSÖ ve AB tarafından, SO₂ için yıllık ortalama sınır değeri önerilmemektedir. Ancak, ülkemizde SO₂ için yıllık ortalama sınır değeri 20 µg/m³ [44] olarak belirlenmiştir. Ülkemiz mevzuatında SO₂ için belirlenen yıllık sınır değeri hiçbir istasyonda aşılmamıştır.

3.1 Kirleticilerin zamansal değişimleri

Şekil 2 istasyonlarda PM₁₀ ve PM_{2.5} konsantrasyonlarının günlük değişimlerini ve Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) tarafından önerilen sınır değerlerini göstermektedir. Yeşil renkler limit değeri altında kalan günlük ortalama konsantrasyonları, sarı, turuncu ve kırmızı renkler ise limit aşımını temsil etmektedir. DSÖ, PM₁₀ ve PM_{2.5} için günlük ortalama değerlerini sırasıyla 45 µg/m³ ve 15 µg/m³ olarak önermektedir. Bu değerlerin bir takvim yılı içerisinde 3-4 defadan fazla aşılmaması gerektiğini belirtmektedir [4]. Önerilen bu sınır değerleri, PM₁₀ için İstasyon 1'de 169 günde, İstasyon 2'de 135 günde, İstasyon 3'te ise 19 günde aşılmıştır. PM_{2.5} için önerilen sınır değeri, İstasyon 1'de 281 günde, İstasyon 2'de 61 günde ve İstasyon 3'te ise 15 günde aşılmıştır. DSÖ SO₂ için günlük ortalama sınır değeri 40 µg/m³ olarak önermektedir [4]. SO₂ sınır değeri için 2023 yılında hiçbir istasyonda limit aşımı kaydedilmemiştir.

PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂'nin istasyonlardaki saatlik ve haftanın günlerine göre zamansal değişimleri Şekil 3'te gösterilmiştir. Kirleticilerin zamansal değişimleri incelendiğinde İstasyon 1'de PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂'nin öğle ve gece yarısında gözlemlenen iki tepeli belirgin bir dağılım gösterdiği görülmektedir. Kirleticilerde görülen bu dağılım, Ulutaş vd. [46] tarafından yapılan başka bir çalışmada da gözlenmiştir. İstasyon 1, trafik kaynaklı emisyonları izlemek için kullanılsa da konum olarak yerleşimin de yoğun olduğu bir bölgede yer almaktadır. Güneşin doğuşu ile tüm kirletici konsantrasyonları artışa geçip, öğle saatlerinde gün içerisindeki ilk maksimum seviyesine ulaşmıştır. Günün ilerleyen saatlerinde konsantrasyonlar düşüşe geçip, İstasyon 1'deki en yüksek konsantrasyonlar güneşin batışı ile başlayan ikinci yükseliş trendinde saat 00:00'da kaydedilmiştir. Öğle saatlerinde görülen ilk tepe, daha çok sabah saatlerinde trafiğin artışına bağlı olarak gerçekleşmiştir. SO₂ genellikle kömür yanmasının izlenmesinde kullanılsa da, trafiğe bağlı olarak da önemli miktarlarda SO₂ atmosfere salınmaktadır [47]. Akşam ve gece saatlerindeki konsantrasyonlardaki artış ise ısınma kaynaklı emisyonlar ve azalan karışım yüksekliği nedeniyle daha düşük dağılım ile ilişkilidir [48]. Kirleticilerin haftanın günlerine göre değişimleri incelendiğinde, genel olarak hafta içi günlerde daha yüksek seviyelerde seyrederken, hafta sonu özellikle pazar günleri düşüş göstermiştir. Bu durum tipik olarak hafta sonu trafiğin düşmesi ile ilişkilidir. Ancak, Şekil

3'te dikkat çeken diğer bir nokta ise SO₂'nin en düşük seviyesinin perşembe günü gözlenmiş olmasıdır. SO₂'deki bu düşüşün, bölgede trafik ve ısınmanın azalan etkisi ile ilişkili olduğu düşünülmektedir.



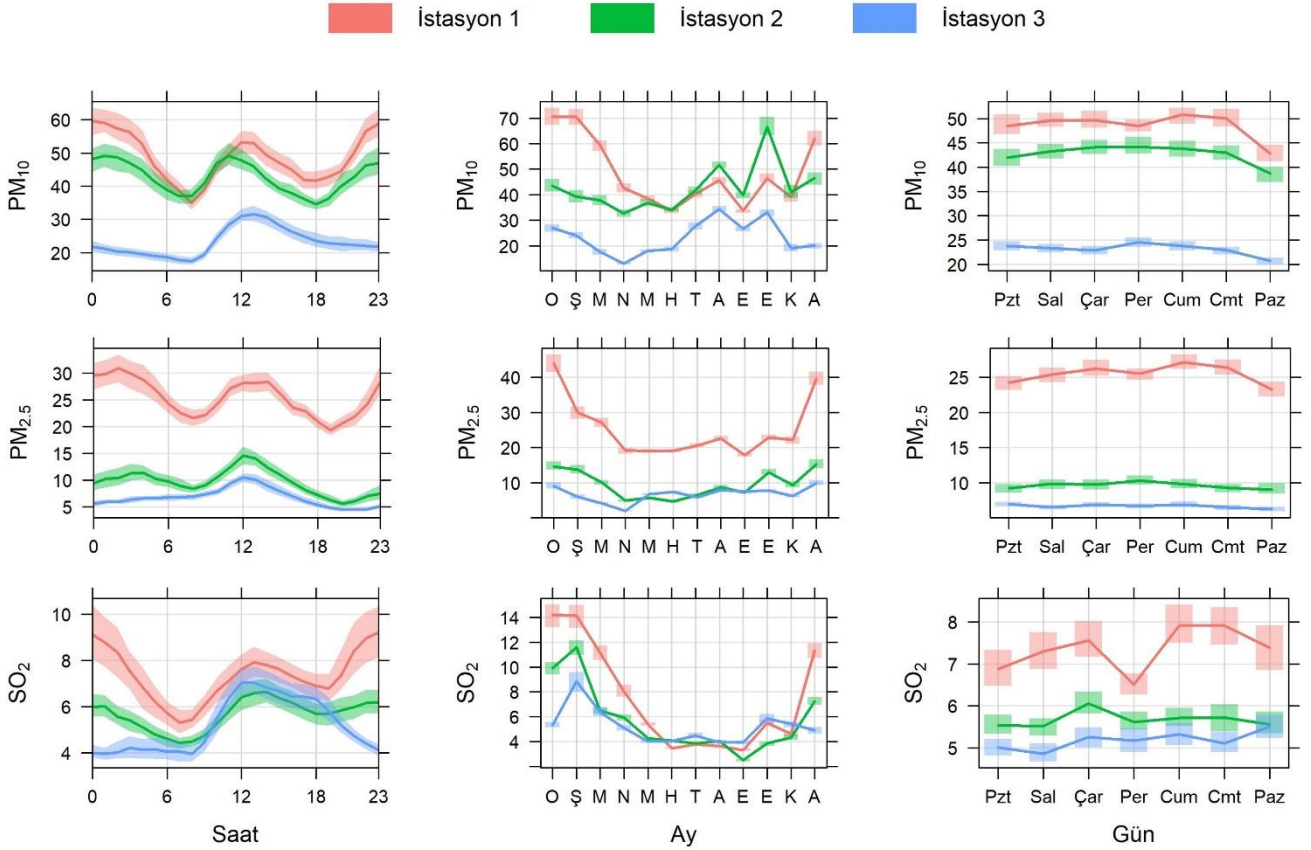
Şekil 2. PM₁₀ ve PM_{2.5}'in istasyonlarda günlük değişimleri (µg/m³)

İstasyon 2'de PM₁₀ seviyeleri, İstasyon 1'e benzer şekilde iki tepeli bir dağılım göstermiştir. Bu durum, bölgede PM₁₀'un hem trafik hem de ısınma kaynaklı olduğunu göstermektedir. PM₁₀'un haftanın günlerine göre değişimi de İstasyon 1'e benzer şekilde hafta içi günlerde daha yüksek konsantrasyonlarda seyredip hafta sonunda düşmüştür. PM_{2.5}'in İstasyon 2'de gün içindeki değişimi PM₁₀'a göre farklılık göstermektedir. PM₁₀ sabah trafiğin yoğunlaştığı saatlerde artışa geçip ilk maksimum noktasına saat 11:00'da ulaşırken, PM_{2.5} maksimum noktasına saat 12:00'da ulaşmıştır. PM₁₀'da saat 18:00'dan itibaren başlayan artış trendi, PM_{2.5}'te ise saat 20:00 civarında başlamıştır. Bu durum, İstasyon 2'de PM_{2.5} üzerinde PM₁₀'a göre trafik ve ısınma kaynaklarının farklı katkılarına göstermektedir. İstasyon 2'de SO₂'nin zamansal değişimi incelendiğinde, konsantrasyonlar sabah saatleri ile artışa geçip saat 12:00'de en yüksek seviyesine ulaşmıştır. Saat 18:00'dan sonra ise konsantrasyonlarda tekrar bir artış gözlemlenmiştir.

İstasyon 3, OSB'ye yakın bir bölgede sanayi kaynaklı emisyonları izlemek için kullanılmaktadır. Mesai saatlerinin PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂ konsantrasyonlarının gün içerisindeki değişimlerine etkisi açıkça görülmektedir. Konsantrasyonlar mesai saatleri ile artışa geçmekte, öğle saatlerinde maksimum seviyesine ulaşmakta ve daha sonra düşüş trendine girmektedir. Saat 12:00-18:00 saatleri arasında gözlemlenen bu düşüş, gün ilerledikçe artan karışım yüksekliği ile ilişkilendirilmektedir [49]. Mesainin bittiği saat 18:00'dan sonra kirleticilerin konsantrasyonlarındaki düşüşler daha belirgin hale gelmektedir. İstasyon 3'te kirleticiler pazar günü düşüş gösterse de bu düşüş diğer istasyonlardaki kadar belirgin değildir.

PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂'nin istasyonlardaki aylık ortalama konsantrasyonları Şekil 3'te gösterilmiştir. İstasyon 1'de tüm kirleticilerde belirgin bir mevsimsellik gözlemlenmektedir. Konsantrasyonlar kış aylarında daha yüksek seyrederken, yaz aylarında düşük seviyelerde kaydedilmiştir. PM₁₀'un kış ayları (Aralık, Ocak ve Şubat) ortalama konsantrasyonu 67.6 µg/m³, yaz ayları ortalaması (Haziran, Temmuz ve Ağustos) 39.8 µg/m³ olarak belirlenmiştir. PM_{2.5}'in kış ayları ortalama konsantrasyonu 37.9 µg/m³, yaz ayları ortalaması ise 20.7 µg/m³ olarak belirlenmiştir. SO₂'nin ise kış aylarında ortalama konsantrasyonu 13.2 µg/m³ iken, bu değer yaz aylarında 3.6 µg/m³ belirlenmiştir. Daha önce de değinildiği gibi, İstasyon 1 hem trafik hem de ısınma kaynaklı emisyonların etkisi altındadır. Kış aylarında başlayan evsel ısınma ve değişen meteorolojik faktörler, bölgede önemli bir kirlilik yükü oluşturmaktadır. Eskişehir'de 2023'te kış aylarında ortalama rüzgâr hızı 1.37 m/sn, yaz aylarında ise 1.57 m/sn olarak ölçülmüştür. Kış aylarındaki daha düşük rüzgâr hızı, kirleticilerinin şehir üzerinde daha uzun süre kalmasına ve kirlilik yüklerinin artmasına neden olmaktadır.

İstasyon 2'de PM₁₀ için yaz ve kış mevsimlerinde belirgin bir mevsimsellik gözlenmemiştir. Yaz aylarında ortalama konsantrasyon 42.5 µg/m³ iken, kış aylarında bu değer 43.1 µg/m³ olarak belirlenmiştir. İstasyon 2'de ortalama konsantrasyonların en yüksek olduğu mevsim sonbahardır ve bu mevsimdeki ortalama konsantrasyon 49.1 µg/m³ olarak ölçülmüştür. Ekim ayındaki 66.1 µg/m³'lük ortalama konsantrasyon, sonbahardaki genel artışta belirgin bir etkiye sahiptir. Ekim ayı, 2023 yılında Eskişehir'de ortalama 1 m/sn rüzgâr hızıyla en düşük hızın ölçüldüğü ay olmuştur. Bu düşük rüzgâr hızının, Ekim ayında İstasyon 2'de PM₁₀'un yüksek seviyelerde gözlenmesinde etkili olduğu düşünülmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, İstasyon 2'de PM₁₀ hem trafik hem de evsel ısınma kaynaklarının etkisi altındadır. Ancak, İstasyon 2'deki evsel ısınmanın PM₁₀ üzerindeki katkısı, İstasyon 1'deki kadar belirgin değildir. PM_{2.5}'in kış ve yaz aylarındaki ortalama konsantrasyonları sırasıyla 14.5 µg/m³ ve 6.6 µg/m³ olarak belirlenmiştir. SO₂ için ise kış aylarında ortalama konsantrasyon 9.6 µg/m³ iken, yaz aylarında bu değer 4 µg/m³ olarak belirlenmiştir. Her iki kirletici de evsel ısınmanın başladığı aylar ile yükselişe geçmektedir. Bu durum, kış aylarında PM_{2.5} üzerinde evsel ısınmanın katkısının daha etkin olduğunu göstermektedir.



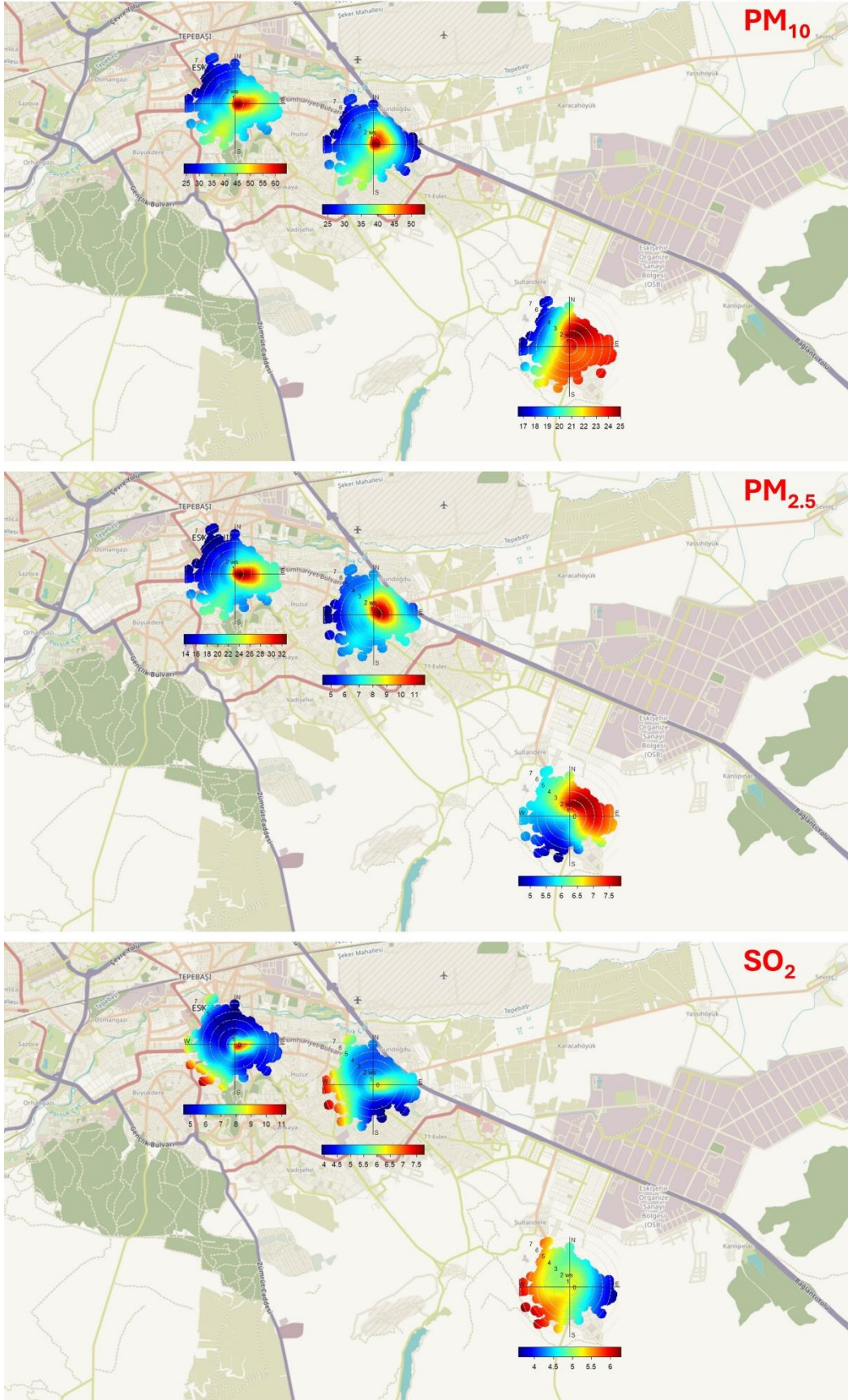
Şekil 3. PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂ konsantrasyonlarının istasyonlarda saatlik, aylık ve günlük değişimleri (µg/m³)

İstasyon 3'te PM₁₀'ün kış ayları ortalaması 23.7 µg/m³, yaz ayları ortalaması ise 26.9 µg/m³ olarak belirlenmiştir. PM₁₀'ün kış ve yaz ayları ortalaması belirgin bir mevsimsellik göstermese de toprağın kuru olduğu Ekim ayına kadar PM₁₀ konsantrasyonları artış trendinde olmuştur. Toprağın kuru olduğu dönemlerde, toprak rüzgarla kolayca havalandığı ve havada askıda halde bulunduğu gözlemlenmektedir [50]. Bu durum, yağışın az olduğu dönemlerde PM₁₀ konsantrasyonlarında artışa neden olmaktadır. PM_{2.5}'in kış aylarında ortalama konsantrasyon 8.2 µg/m³ iken, yaz aylarında ortalama konsantrasyon 7 µg/m³ olarak belirlenmiştir. PM_{2.5}'in PM₁₀'dan farklı olarak kış aylarında daha yüksek konsantrasyonlarda gözlenmesinde ısınmaya bağlı emisyonlardaki artışın etkili olduğu düşünülmektedir. SO₂'nin ise kış aylarında ortalama konsantrasyonu 6.4 µg/m³ iken, bu değer yaz aylarında 4.1 µg/m³ belirlenmiştir. Bölüm 3.2'de tartışıldığı gibi, kış aylarında SO₂ konsantrasyonlarındaki artışın nedeni, şehir merkezinden taşınımın etkili olmasıdır.

3.2 İki değişkenli polar grafik sonuçları

Eskişehir il merkezinde 2023 yılında hâkim rüzgâr yönleri doğu, batı ve kuzey batı olmuştur (Şekil 1). Kış aylarında hâkim rüzgâr yönü doğu iken, yaz aylarında batı ve kuzey batılı yönler olmuştur. Şekil 4, PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂ konsantrasyonlarının istasyonlarda rüzgâr yönüne ve rüzgâr hızına göre ilişkilerini iki değişkenli polar grafikler ile göstermektedir. PM₁₀'un istasyonlardaki iki değişkenli polar

grafiklerine göre, İstasyon 1'de 0-2 m/sn rüzgâr hızı aralığında doğu yönündeki kaynakların etkisi ortalama 55-65 µg/m³ aralığında gözlenmiştir. Düşük rüzgâr hızı ile gözlemlenen bu PM₁₀ seviyeleri, kaynakların istasyona yakınlığını ve emisyonların fazla olmasını göstermektedir. Bu durum, bölgedeki trafiğin önemli katkısını göstermektedir. Rüzgâr hızı 5 m/sn'ye çıktığında güney batılı yönlerden 45-50 µg/m³ aralığında taşınım gözlenmiştir. Bu durum, yerleşim yerlerinin yoğun olduğu bölgeleri ve dolayısıyla evsel ısınmanın etkisini göstermektedir. İstasyon 2'de, rüzgâr hızı 0-2 m/sn aralığında kuzey doğulu yönünden yüksek seviyelerde PM₁₀ taşınımını göstermektedir. Bu yönde Ankara-Bursa D200 karayolu bulunmaktadır, dolayısıyla bu yönden taşınımın trafik kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Rüzgâr hızı 5 m/sn'ye kadar çıktığında ve güney batıdan estiği durumlarda taşınımın yerleşim bölgelerinden gerçekleşmektedir. İstasyon 2'de evsel ısınmanın katkısı, İstasyon 1'e kıyasla daha düşüktür; bu durum güney batılı yönlerden konsantrasyonların daha düşük seviyelerde taşınmasıyla görülmektedir. İstasyon 3'te ise kuzey, doğu ve güney yönlerinden esen rüzgarlarla gerçekleşen taşınımın PM₁₀'a önemli katkıları gözlenmektedir. Özellikle rüzgârın kuzey doğu yönünden estiğinde, OSB bölgesinin katkısı daha fazla olmaktadır. İstasyon, yarı kırsal bir bölgede kurulu olduğu için, rüzgârın doğu ve güney yönlerinden estiğinde bölgede toprak taşınımının etkili olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4. PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂'nin iki değişkenli polar grafikleri (µg/m³)

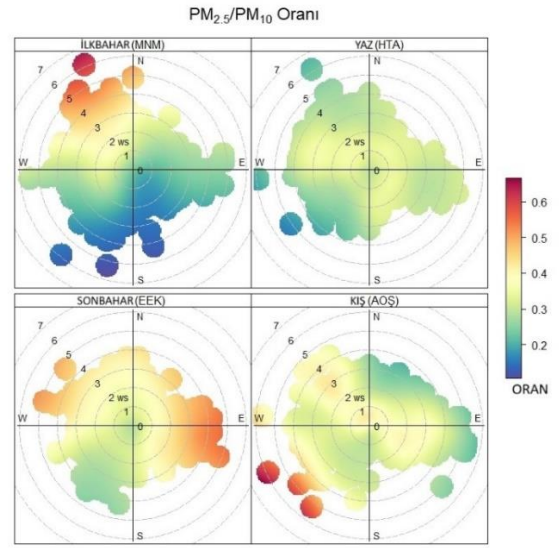
Şekil 4'te PM_{2.5}'in istasyonlardaki iki değişkenli polar grafiklerine göre, İstasyon 1 ve İstasyon 2'deki taşınım benzerlik göstermektedir. Yine PM₁₀'da olduğu gibi, 0-2 m/sn hızlarındaki taşınımlar trafiğin etkisini yansıtırken, rüzgâr hızının arttığı ve güney batılı yönlerden estiği durumlarda evsel ısınmanın etkisi görülmektedir. Ancak, İstasyon 2'de evsel ısınmanın etkisi İstasyon 1'deki kadar belirgin değildir. İstasyon 3'te ise rüzgârın kuzey ve doğu yönleri arasında kalan yönlerden estiği durumlarda OSB bölgesinin etkisi gözlenmektedir.

SO₂'nin Şekil 4'te iki değişkenli polar grafiklerine göre, tüm istasyonlardaki taşınım konumlarından dolayı yönde farklılıklar gösterse de yerleşimin yoğun olduğu batılı yönlerden evsel ısınma kaynaklı emisyonları işaret etmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, İstasyon 1'de trafiğin belirgin etkisi yine düşük rüzgâr hızlarında doğu yönünde gözlenmiştir.

3.3 Konsantrasyon ağırlıklı yörünge sonuçları

PM_{2.5}'in PM₁₀'a oranı, atmosferdeki partikül madde kirliliği kaynaklarını anlamak için kritik bir göstergedir. Düşük PM_{2.5}/PM₁₀ oranları doğal kaynaklardan gelen kaba partiküllerin yaygınlığını işaret ederken, yüksek oranlar antropojenik kaynaklarla daha güçlü bir ilişkiyi işaret etmektedir [51]. Daha önce de değinildiği gibi İstasyon 3'te rüzgârın doğudan ve güneyden estiği durumlarda bölgede toprak taşınımının etkili olduğu düşünülmektedir. Bu durumu doğrulamak için İstasyon 3'te mevsimlere göre PM_{2.5}/PM₁₀ oranları için hazırlanan iki değişkenli polar grafikleri Şekil 5'te verilmiştir. Şehir merkezi İstasyon 3'e göre batılı yönlerde bulunmaktadır. Tüm mevsimlerde rüzgârın >3 m/sn ile batılı yönlerden estiği durumlarda PM_{2.5}/PM₁₀ oranı artmaktadır. Bu durum, PM₁₀ kütlesi üzerindeki antropojenik etkiyi göstermektedir. Ayrıca, sonbahar mevsiminde rüzgârın doğulu yönlerden 2-5 m/sn hızlarında estiği durumda da PM_{2.5}/PM₁₀ oranı artmaktadır. Rüzgârın doğu yönlerinden estiği zamanlarda PM_{2.5}/PM₁₀ oranındaki artışta Organize Sanayi Bölgesinin ve Ankara-Bursa D200 karayolundaki taşıt trafiğinin etkili olduğu düşünülmektedir. Rüzgârın ilkbahar, yaz ve sonbahar mevsimlerinde güneyden estiği, kış mevsiminde ise doğudan estiği durumlarda PM_{2.5}/PM₁₀ oranı düşmektedir. Bu durum da İstasyon 3'e güney ve doğu yönlerinden toprak kaynaklı taşınımı göstermektedir.

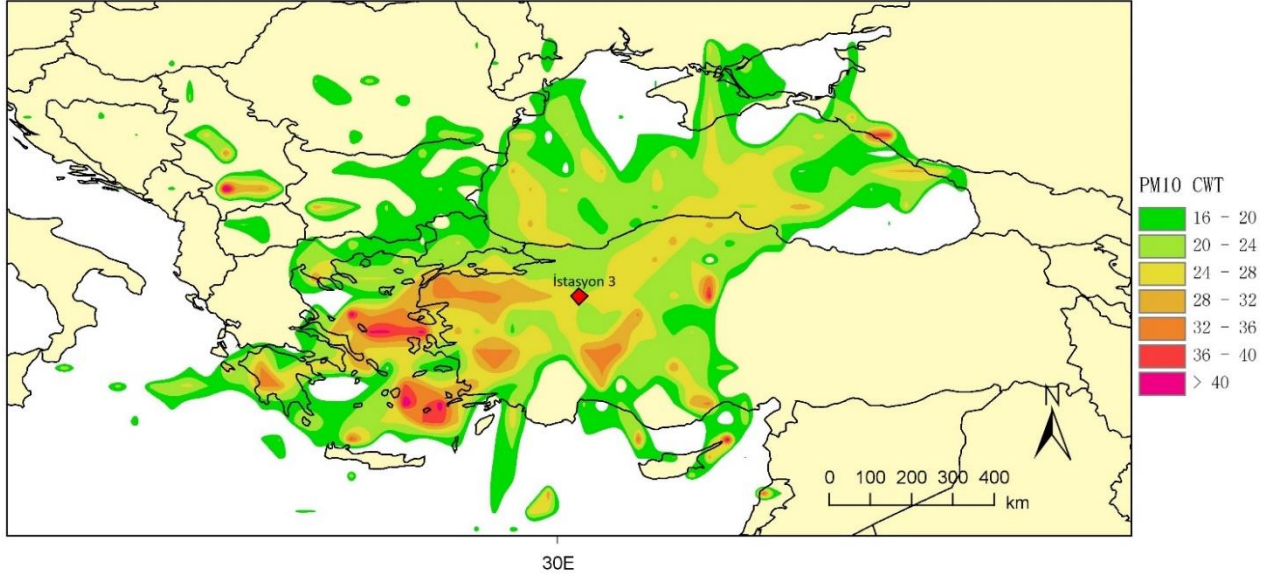
İstasyon 3'te taşınımla gelen PM₁₀'un muhtemel kaynak bölgelerinin ve bu bölgelerin katkılarının belirlenmesi için oluşturulan konsantrasyon ağırlıklı yörünge haritası Şekil 6'da verilmiştir. Konsantrasyon ağırlıklı yörünge model haritası incelendiğinde, İstasyon 3'te PM₁₀'a 28 – 36 µg/m³ aralığında önemli katkı sağlayan bölgelerin Türkiye'de Konya havzası, Balıkesir – Çanakkale arasında kalan bölge ve Uşak olduğu görülmektedir. Bu bölgeler Türkiye'nin en kurak ve yarı kurak bölgeleri arasında yer almaktadır [52, 53]. Bu bölgelerin Türkiye'de önemli toz kaynak alan bölgeleri arasında yer aldığı farklı çalışmalarda da belirtilmiştir [54, 55]. Türkiye'deki bu bölgelere ek olarak özellikle Yunanistan PM₁₀ konsantrasyonlarına yüksek katkı sağlayan bölgeler arasında yer almaktadır.



Şekil 5. İstasyon 3'te PM_{2.5}/PM₁₀ oranının mevsimsel iki değişkenli polar grafikleri

4 Sonuçlar

Kentlerdeki hava kalitesi, insan sağlığını tehdit eden önemli bir problemdir. Eskişehir, 900000 üzerindeki nüfusu ve yoğun sanayisi ile hava kirliliği probleminin yaşandığı şehirlerden biridir [56]. Ulusal Hava Kalitesi Ağında yer alan 3 istasyondan elde edilen PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂ verileri 2023 yılı için incelendiğinde, tüm istasyonlarda PM₁₀ ve PM_{2.5}'in DSÖ tarafından önerilen sınır değerleri çok defa aştığı ve kaynakların Eskişehir'de PM açısından önemli bir yük oluşturduğu belirlenmiştir. Dünya genelinde her yıl yaklaşık 7 milyon, Avrupa'da ise yaklaşık 900000 insanın PM_{2.5}'e maruz kalması nedeniyle öldüğünü tahmin edilmektedir [57]. Tarin-Carrasco vd. [57] artan nüfusa ve PM maruziyetine bağlı olarak, Avrupa'da 2050 yılında bu oranın %73 artacağını öngörmektedir. Ülkemizde PM kirliliğinin mortalite üzerindeki etkisini birçok çalışmada incelenmiştir. Ulusoy [1] tarafından yapılan çalışmada, Zonguldak'ta 2020 – 2022 yılları arasında PM'ye atfedilebilir tahmini ölüm oranlarının %18.75 ile %18.95 arasında değiştiği ve hava kirliliğine atfedilen tahmini ölüm sayılarının ise 810 ile 927 arasında değiştiği belirtilmiştir. Koçak ve Balcılar [55] tarafından yapılan çalışmada, Ankara'nın 8 farklı bölgesinde 2020-2022 yılları arasında PM_{2.5} maruziyetine bağlı olarak atfedilebilir tahmini ölüm oranlarının %4.38 ile %25.25 arasında değiştiği belirtilmiştir. Ayrıca, nüfusun yoğun olduğu bölgelerde artan PM_{2.5} konsantrasyonlarına bağlı olarak ölüm oranlarının da arttığı ifade edilmiştir. Yapılan bu çalışmalar, özellikle nüfusun yoğun olarak yaşadığı Eskişehir'in İstasyon 1 ve İstasyon 2 bölgelerinde PM konsantrasyonlarının sınır değerlerinin üzerinde kaydedilmesinin, kentin halk sağlığı üzerinde ciddi potansiyel etkilere sahip olduğunu göstermektedir. Tüm dünyada ve ülkemizde SO₂ emisyonlarının azaltılmasına yönelik çabalar ile kentlerde doğalgaz kullanımının yaygınlaştırılması sonucu SO₂ konsantrasyonlarının limit değerleri aşmadığı görülmüştür.



Şekil 6. PM₁₀'un potansiyel kaynak bölgeleri ve bu bölgelerin PM₁₀ konsantrasyonlarına ağırlıklı katkıları (µg/m³)

Eskişehir il merkezinde kaynakların ve katkılarının etkin bir şekilde değerlendirilmesi için kirleticilerin mekânsal ve zamansal değişimleri ile iki değişkenli polar grafikleri incelenmiştir. İstasyon 1'de kirleticiler üzerinde trafiğin tüm yıl boyunca, kış aylarında evsel ısınmanın başlamasıyla da yanma kaynaklı emisyonların etkili olduğu görülmüştür. İstasyon 2'de ise PM₁₀'un trafik ve ısınma kaynaklı olduğu, PM_{2.5} konsantrasyonları üzerinde evsel ısınmanın daha etkili olduğu görülmüştür. İstasyon 3, şehir merkezine 10 km mesafede yarı kentsel bir alanda bulunmaktadır. Bu istasyonda PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂ konsantrasyonları diğer istasyonlara göre daha düşük seviyelerde kaydedilmiştir. PM_{2.5} üzerinde OSB bölgesinden kaynaklanan emisyonlar etkin olduğu, SO₂'nin ise kış aylarında şehir merkezinden gerçekleşen taşınım ile arttığı gözlenmiştir. İstasyon 3'te PM₁₀'un hem OSB hem de toprak kaynaklı olduğu görülmüştür. Bölgedeki PM₁₀ seviyeleri üzerindeki toprak katkısını doğrulamak amacıyla PM_{2.5}/PM₁₀ oranının mevsimlere göre polar grafikleri incelenmiştir. Tüm mevsimlerde rüzgârın batılı yönlerden estiği durumlarda PM_{2.5}/PM₁₀ oranının arttığı, rüzgârın güney yönünden estiği ilkbahar, yaz ve sonbahar mevsimleri ile doğu yönünden estiği kış mevsiminde ise bu oranın düştüğü görülmüştür. Bölgeye taşınım ile gelen PM₁₀'un kaynak bölgelerini ve bu bölgelerin katkılarını belirlemek için konsantrasyon ağırlıklı yörünge modeli kullanılmıştır. CWT model sonuçları ülkemizde İç Anadolu ve Ege bölgeleri ile Yunanistan üzerinden gelen hava kütlelerinin Eskişehir'de PM₁₀ yüküne etki ettiğini göstermiştir.

Bu çalışmanın sonuçları, Eskişehir'de hava kalitesini iyileştirmek için kent düzeyinde önlemler alınmasının gerektiğini vurgulamaktadır. Aynı zamanda, Eskişehir'deki süregelen hava kirliliği sorunlarını çözmek için kapsamlı hava kalitesi izleme ve kamta dayalı politika

müdahalelerinin önemine dikkat çekmektedir. Özellikle nüfusun yoğun olduğu bölgelerde PM konsantrasyonlarının tüm yıl boyunca trafik nedeniyle yüksek olduğu tespit edilmiştir. Kış aylarında ise evsel ısınmanın başlaması, hava kalitesini olumsuz etkileyen önemli bir diğer faktör olarak belirlenmiştir. Bu bölgelerde, trafik yoğunluğunu azaltıcı önlemler alınması büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, evsel ısınmada hâlâ katı yakıtların kullanıldığı yerlerde doğalgaza geçişin teşvik edilmesi önerilmektedir. Eskişehir'de hava kalitesinin iyileştirilmesine yönelik uzun vadeli stratejileri içeren Temiz Hava Planları hazırlanarak uygulanması, hava kalitesi probleminin önemli ölçüde iyileştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Teşekkür

Yazar, bu çalışmada kullanılan kirletici verilerini sağladığı için Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'na teşekkür eder.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

- [1] K. Ulusoy, Zonguldak'ta PM_{2.5} odaklı hava kirliliği-mortalite ilişkisinin incelenmesi. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13(1), 301-308, 2023. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1372.285>.
- [2] U. A. Bhatti, Z. Zeeshan, M. M. Nizamani, S. Bazai, Z. Yu and L. Yuan, Assessing the change of ambient air quality patterns in Jiangsu Province of China pre-to post-COVID-19. Chemosphere, 288, Pt 2, 132569, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132569>.

- [3] T. Lauriks, R. Longo, D. Baetens, M. Derudi, A. Parente, A. Bellemans, J. Van Beeck and S. Denys, Application of improved CFD modeling for prediction and mitigation of traffic-related air pollution hotspots in a realistic urban street. *Atmospheric Environment*, 246, 118127, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118127>.
- [4] WHO, 2022 Ambient (outdoor) air pollution. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health), Erişim Tarihi 01 Mart 2024.
- [5] B. Caliskan, N. Özençin and S. S. Cindoruk, Air quality level, emission sources and control strategies in Bursa/Turkey. *Atmospheric Pollution Research*, 11, 12, 2182-2189, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.05.016>.
- [6] M. F. Sari and F. Esen, Atmospheric concentration, spatial variations, and source identification of persistent organic pollutants in urban and semi-urban areas using passive air samplers in Bursa, Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-11, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17987-1>.
- [7] E. Yücer, A. Erener and G. Sarp, A land use regression model to estimate ambient concentrations of PM10 and SO2 in İzmit, Turkey. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 51, 6, 1329-1341, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12524-023-01704-1>.
- [8] V. Singh, S. Singh, A. Biswal, A. P. Kesarkar, S. Mor and K. Ravindra, Diurnal and temporal changes in air pollution during COVID-19 strict lockdown over different regions of India. *Environmental Pollution*, 266, 115368, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115368>.
- [9] J. Maffia, E. Dinuccio, B. Amon and P. Balsari, PM emissions from open field crop management: emission factors, assessment methods and mitigation measures – A Review. *Atmospheric Environment*, 226, 117381, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117381>
- [10] B. A. Maher, V. O'Sullivan, J. Feeney, T. Gonet and R. A. Kenny, Indoor particulate air pollution from open fires and the cognitive function of older people. *Environmental Research*, 192, 110298, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110298>.
- [11] S. K. Kharol, V. Fioletov, C. A. McLinden, M. W. Shephard, C. E. Sioris, C. Li and N. A. Krotkov, Ceramic industry at morbi as a large source of SO2 emissions in India. *Atmospheric Environment*, 223, 117243, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117243>.
- [12] A. L. d. Jesus, M. H. Thompson, L. D. Knibbs, M. Kowalski, J. Cyrus, J. V. Niemi, A. Kousa, H. Timonen, K. Luoma, T. Petäjä, D. C. S. Beddows, R. M. Harrison, P. K. Hopke and L. Morawska, Long-Term trends in PM2.5 mass and particle number concentrations in urban air: The impacts of mitigation measures and extreme events due to changing climates. *Environmental Pollution*, 263, Part A 114500, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114500>.
- [13] S. Sayols-Baixeras, A. Fernández-Sanlés, A. Prats-Urbe, I. Subirana, M. Plusquin, N. Künzli, J. Marrugat, X. Basagaña and R. Elosúa, Association between long-term air pollution exposure and DNA methylation: The REGICOR Study. *Environmental Research*, 176, 108550, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108550>.
- [14] A. Bari, W. B. Kindzierski and P. Roy, Identification of ambient SO₂ sources in industrial areas in the Lower Athabasca Oil Sands Region of Alberta, Canada. *Atmospheric Environment*, 231, 117505, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117505>.
- [15] T. F. Mebrahtu, G. Santorelli, T. Yang, J. Wright, J. Tate and R. McEachan, The effects of exposure to NO₂, PM_{2.5} and PM₁₀ on health service attendances with respiratory illnesses: A time-series analysis. *Environmental Pollution*, 333, 122123, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122123>.
- [16] S. Kong, Q. Yan, H. Zheng, H. Liu, W. Wang, S. Zheng, G. Yang, M. Zheng, J. Wu, S. Qi, G. Shen, L. Tang, Y. Yin, T. Zhao, H. Yu, D. Liu, D. Zhao, Z. Tao, J. Ruan and M. Huang, Substantial reductions in ambient PAHs pollution and lives saved as a co-benefit of effective long-term PM_{2.5} pollution controls. *Environment International*, 114, 266-279, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.03.002>.
- [17] K. Ulutas, S. K. M. Abujayyab, S. S. Abu Amr, A. F. M. Alkarkhi and S. Duman, The effect of air quality parameters on new COVID-19 cases between two different climatic and geographical regions in Turkey. *theoretical and Applied Climatology* 152, 1-2, 801-812, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04420-5>.
- [18] K. Ulutaş, Prediction of mortality attributed to NO₂ Air pollutant in Sakarya by using Airq+ software for 2018 and 2019. *ESTÜDAM Halk Sağlığı Dergisi*, 7, 2, 315-325, 2022. <https://doi.org/10.35232/estudamhds.1060529>.
- [19] K. J. Maji, V. O. Li and J. C. K. Lam, Effects of China's current air pollution prevention and control action plan on air pollution patterns, health risks and mortalities in Beijing 2014–2018. *Chemosphere*, 260, 127572, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127572>.
- [20] K. M. Molepo, B. J. Abiodun and R. N. Magoba, The transport of PM₁₀ over Cape Town during high pollution episodes. *Atmospheric Environment*, 213, 116-132, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.05.041>.
- [21] B. Barhoumi, M. Tedetti, J. A. T. Onrubia, A. Dufour, T.-Q. Doan, S. Boutaleb, S. Touil and M. L. Scippo, Chemical Composition and In vitro Aryl Hydrocarbon Receptor-Mediated activity of atmospheric particulate matter at an urban, agricultural and industrial site in North Africa (Bizerte, Tunisia). *Chemosphere*, 258, 127312, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127312>.
- [22] X. Xu, N. Qin, Z. Yang, Y. Liu, S. Cao, B. Zou, L. Jin, Y. Zhang and X. Duan, Potential for Developing independent daytime/nighttime LUR Models based on short-term mobile monitoring to improve model

- performance. *Environmental Pollution*, 268, Part B, 115951, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115951>.
- [23] R. Xue, S. Wang, D. Li, Z. Zou, K. L. Chan, P. Valks, A. Saiz-Lopez and B. Zhou, Spatio-Temporal variations in NO₂ and SO₂ over Shanghai and Chongming eco-island measured by Ozone Monitoring Instrument (OMI) during 2008–2017. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120563, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120563>.
- [24] A. Jakob, S. Hasibuan and D. Fiantis, Empirical evidence shows that air quality changes during COVID-19 pandemic lockdown in Jakarta, Indonesia Are Due to Seasonal Variation, Not Restricted Movements. *Environmental Research*, 208, 112391, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112391>.
- [25] O. Ozden, T. Dogeroglu and S. Kara, Assessment of ambient air quality in Eskisehir, Turkey. *Environment International*, 34, 5, 678-87, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.12.016>.
- [26] E. O. Gaga and A. Ari, Gas–particle partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in an urban traffic site in Eskisehir, Turkey. *Atmospheric Research*, 99, 2, 207-216, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.10.013>.
- [27] Ö. Özden Üzmez, E. O. Gaga and T. Döğeroğlu, Development and field validation of a new diffusive sampler for determination of atmospheric volatile organic compounds. *Atmospheric Environment*, 107, 174-186, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.02.040>.
- [28] T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, Eskişehir Coğrafya Yapısı. <https://eskisehir.ktb.gov.tr/TR-70841/cografya-yapisi.html>, Erişim Tarihi 12 Mart 2024.
- [29] Türkiye İstatistik Kurumu, Nüfus istatistikleri portalı. <https://nip.tuik.gov.tr/?value=CinsiyeteGoreNufus>, Erişim Tarihi 12 Mart 2024.
- [30] Bursa Eskişehir Bilecik Kalkınma Ajansı, Eskişehir Ekonomik Yapı. <https://www.investineskisehir.gov.tr/ekonomik-yapi/>, Erişim Tarihi 12 Mart 2024.
- [31] Eskişehir Organize Sanayi Bölgesi, Tarihçe. <https://mobil.eosb.org.tr/vPage/hakkimizda>, Erişim Tarihi 12 Mart 2024.
- [32] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı. https://sim.csb.gov.tr/STN/STN_Report/StationDataDownloadNew, Erişim Tarihi 20 Aralık 2023.
- [33] E. Koçak, Aksaray kentinin PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyonlarının zamansal değişimi: koşullu iki değişkenli olasılık fonksiyonu ve K-means kümeleme. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6, 3, 471-478, 2018. <https://doi.org/10.21923/jesd.426741>.
- [34] E. Koçak, Prediction of daily fine particulate matter (PM_{2.5}) concentration in Aksaray, Turkey: Temporal variation, meteorological dependence, and employing artificial neural network. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 43, 2, e14355, 2024. <https://doi.org/10.1002/ep.14355>.
- [35] J. A. Espinoza-Guillen, M. B. Alderete-Malpartida, J. H. Cañari-Cancho, D. L. Pando-Huerta, D. F. Vargas-La Rosa and S. J. Bernabé-Meza, Immission levels and identification of sulfur dioxide sources in La Oroya city, Peruvian Andes. *Environment, Development and Sustainability*, 25, 11, 12843-12872, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02592-0>.
- [36] Y. Chang, C. Deng, F. Cao, C. Cao, Z. Zou, S. Liu, X. Lee, J. Li, G. Zhang and Y. Zhang, Assessment of carbonaceous aerosols in Shanghai, China–Part 1: long-term evolution, seasonal variations, and meteorological effects. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 16 9945-9964, 2017. <https://doi.org/10.5194/acp-17-9945-2017>.
- [37] I. Uria-Tellaetxe and D. C. Carslaw, Conditional bivariate probability function for source identification. *Environmental Modelling & Software*, 59, 1-9, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.05.002>.
- [38] F. Dominici, A. McDermott, S. L. Zeger and J. M. Samet, On the use of generalized additive models in time-series studies of air pollution and health. *American Journal of Epidemiology*, 156, 3, 193-203, 2002. <https://doi.org/10.1093/aje/kwf062>.
- [39] D. C. Carslaw and K. Ropkins, Openair-an R package for air quality data analysis. *Environmental Modelling & Software*, 27, 52-61, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.09.008>.
- [40] E. Busa, B. Gugamsetty, R. O. R. Kalluri, R. G. Kotalo, C. R. Tandule, L. R. Thotli, M. Chakala and S. N. R. Palle, Diurnal, seasonal, and vertical distribution of carbon monoxide levels and their potential sources over a semi-arid region, India. *Atmósfera*, 35, 1, 165-178, 2022. <https://doi.org/10.20937/ATM.52808>.
- [41] Y. Wang, An open source software suite for multi-dimensional meteorological data computation and visualisation. *Journal of Open Research Software*, 7, 1, 21, 2019. <http://doi.org/10.5334/jors.267>.
- [42] C. He, S. Hong, H. Mu, P. Tu, L. Yang, B. Ke and J. Huang, Characteristics and meteorological factors of severe haze pollution in China. *Advances in Meteorology*, 2021, 1-15, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6680564>.
- [43] X. Tang, X. Chen and Y. Tian, Chemical composition and source apportionment of PM_{2.5}—A case study from one year continuous sampling in the Chang-Zhu-Tan urban agglomeration. *Atmospheric Pollution Research*, 8, 5, 885-899, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2017.02.004>.
- [44] T.C. Cumhurbaşkanlığı Menzuat Bilgi Sistemi, Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği. <https://www.mevzuat.gov.tr/File/GeneratePdf?mevzuatNo=12188&mevzuatTur=KurumVeKurulusYonetmeli&mevzuatTertip=5>, Erişim Tarihi 9 Haziran 2024.
- [45] European Commission, EU air quality standards. https://environment.ec.europa.eu/topics/air/air-quality/eu-air-quality-standards_en, Erişim Tarihi 9 Haziran 2024.
- [46] K. Ulutaş, S. K. M. Abujayyab and S. Abu Amr, Evaluation of the major air pollutants levels and its

- interactions with meteorological parameters in Ankara. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9, 4, 1284-1295, 2021. <https://doi.org/10.21923/jesd.939724>.
- [47] M. Yang, T. Ma and C. Sun, Evaluating the impact of urban traffic investment on SO₂ emissions in China cities. *Energy Policy*, 113, 20-27, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.039>.
- [48] V. Singh, S. Singh, A. Biswal, A. P. Kesarkar, S. Mor and K. Ravindra, Diurnal and temporal changes in air pollution during COVID-19 strict lockdown over different regions of India. *Environmental Pollution*, 266, 3, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.11.5368>.
- [49] S. Mor, S. A. Kumar, T. Singh, S. Dogra, V. Pandey and K. Ravindra, Impact of COVID-19 lockdown on air quality in Chandigarh, India: Understanding the emission sources during controlled anthropogenic activities. *Chemosphere*, 263, 127978, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127978>.
- [50] G. Prabhakar, A. Sorooshian, E. Toffol, A. F. Arellano and E. A. Betterton, Spatiotemporal distribution of airborne particulate metals and metalloids in a populated Arid Region. *Atmospheric Environment*, 92, 339-347, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.044>.
- [51] V. Evagelopoulos, P. Begou, P. Kassomenos and S. Zoras, Investigation of the particulate air pollution and the ratio of PM_{2.5} to PM₁₀ concentrations in the atmosphere over the lignite mining and lignite-fired power plants region of Western Macedonia, Greece. *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*, 1113, 012077, 2022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1123/1/012077>.
- [52] S. Dursun, Effects of climate change and drought in Konya: A Review. *International Journal of Ecosystems and Ecology Science (IJEES)*, 10, 4, 595-602, 2020. <https://doi.org/10.31407/ijeec.10.403>.
- [53] D. D. Yavaşlı and E. Erlat, Climate model projections of aridity patterns in Türkiye: A comprehensive analysis using CMIP6 models and three aridity indices. *International Journal of Climatology*, 43, 13, 6207-6224, 2023. <https://doi.org/10.1002/joc.8201>.
- [54] E. S. Uzunpinar, I. Imamoglu, A. Rahmani and G. Tuncel, Modification of Saharan dust size distribution during its transport over the Anatolian Plateau. *Sci Total Environ*, 892, 164646, Sep 20 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164646>.
- [55] E. Koçak and İ. Balcılar, Spatio-temporal variation of particulate matter with health impact assessment and long-range transport - case study: Ankara, Türkiye. *Science of the Total Environment*, 938, 173650, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173650>.
- [56] Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Eskişehir Temiz Hava Eylem Planı THEP (2014-2019), 2014, Erişim Adresi: <https://webdosya.csb.gov.tr/db/eskisehir/webicerik/webicerik1221.pdf>.
- [57] P. Tarín-Carrasco, U. Im, C. Geels, L. Palacios-Peña and P. Jiménez-Guerrero, Contribution of fine particulate matter to present and future premature mortality over Europe: A non-linear response. *Environment International*, 153, 106517, 2021. <https://doi.org/10.1016%2Fj.envint.2021.106517>.





Germanyum piramit dizisinin etkin yüzey silanizasyonu ve floresan etiketlenmesi: Optimizasyon ve karakterizasyon

Efficient surface silanization and fluorescent labelling of germanium pyramid array: Optimization and characterization

Sabriye Açıkgöz^{1,*}, Hasan Yünger², Ayşegül Şahin³, Emin Özunal⁴

^{1,2,3,4} Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 70200, Karaman Türkiye

Öz

Günümüzde homojen germanyum (Ge) piramit dizileri güneş hücreleri, fotodetektörler ve yeni nesil yarı iletken lazerler gibi pek çok uygulama alanında karşımıza çıkmaktadır. Germanyum piramit yüzeylerin kullanım alanlarının daha çok geliştirilebilmesi kimyasal ve biyolojik sensör gibi uygulamalarda da aktif olarak kullanılabilmesi için bu yüzeylerin biyolojik moleküllere hızlı cevap verecek şekilde modifiye edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada germanyum piramit yüzeylerinin 3-aminopropiltrietoksilan (APTES) ile modifiye edilerek biyolojik moleküllere açık olacak şekilde işlevselleştirilmesi için basit ve düşük maliyetli bir yöntem araştırılmıştır. APTES'in germanyum yüzeylerinde varlığını belirlemek için APTES ile modifiye edilmiş germanyum yüzeyler floresan BODIPY molekülleri ile etiketlenmiştir. Silanizasyon süreci boyunca, reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığının yığınsal germanyum ve piramit dizisine yerleşen APTES molekülleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Farklı reaksiyonlarla üretilen numuneler, fotoluminesans spektroskopisi (PL) ve floresan yaşam ömrü görüntüleme mikroskobu (FLIM) ile karakterize edilmiştir. APTES moleküllerinin oldukça iyi bir yüzey tutunması sağlayabilmesi için optimum reaksiyon süresi ve işlem sıcaklığı sırasıyla 24 saat ve 60 0C olarak belirlenmiştir. FLIM mikroskobu ile görüntülenen piramitler üzerinde BODIPY moleküllerinin yaşam ömrü 2,4 ns olarak ölçülmüştür. APTES uygulaması elektronik açıdan önemli yarı iletken yüzeylerde çeşitli molekülleri hareketsiz hale getirmek ve yüksek performanslı yeni optoelektronik cihazlar üretmek için sağlam ve güvenilir bir yol sunabilir.

Anahtar kelimeler: Germanyum piramit, APTES, Silanizasyon, BODIPY, FLIM mikroskobu.

1 Giriş

Gelişen teknoloji ile birlikte fonksiyonel optoelektronik aygıtların üretimine verilen önem her geçen gün artmaktadır. Bu optoelektronik aygıtların en temel bileşeni ise fonksiyonel yapıya sahip olan yarı iletken yüzeylerdir. Yığınsal bir yarı iletkenin yüzeyinde farklı şekil ve boyutlarda mikro ya da nano yapılar oluşturularak bu yarı iletken yüzeyin hem elektriksel hem de optik açıdan

Abstract

Nowadays homogeneous germanium (Ge) pyramid arrays are emerging in many application areas such as solar cells, photodetectors and next-generation semiconductor lasers. To enhance the application areas of germanium pyramid surfaces, particularly in chemical and biological sensors, these surfaces need to be modified to rapidly respond to biological molecules. In this work, a simple and cost-effective method was investigated to modify germanium pyramid surfaces with 3-aminopropyltriethoxysilane (APTES), enabling them to be functionalized for interaction with biological molecules. In order to establish the presence of APTES on germanium surfaces, APTES modified surfaces were labeled with fluorescent BODIPY molecules. During the silanization process, the effects of reaction time and reaction temperature were studied for the attachment of APTES on bulk germanium and pyramid array. The products of different reactions were characterized using photoluminescence spectroscopy (PL) and fluorescence lifetime imaging microscopy (FLIM). The optimum reaction time and processing temperature for a reasonably good surface coverage by APTES molecules were determined as 24 hour and 60 0C, respectively. The fluorescence lifetime of BODIPY molecules on pyramids monitored with FLIM microscope was measured as 2.4 ns. APTES treatment can offer a robust and reliable pathway to immobilize various molecules on electronically important semiconductor surfaces and fabricate new optoelectronic devices with high performance.

Keywords: Germanium pyramid, APTES, Silanization, BODIPY, FLIM microscope.

güçlendirilmesi ve böylece ona bazı nadir özelliklerin kazandırılması sağlanabilir [1,2]. Literatürde silisyum yarı iletken yüzeyinde kuantum noktalar [3], gözenekler [4,5], nano teller [6,7], nano koniler [8] ve nano piramitler [9-11] gibi farklı türden nano yapıların üretildiğini ve bu yüzeylerin yüksek performanslı aygıt tasarımında başarılı bir şekilde kullanıldığını gösteren pek çok çalışma bulunmaktadır. Silisyumun diğer yarı iletkenler ile kıyaslandığında uygun

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: sabriyeacikgoz@gmail.com (S. Açıkgöz)

Geliş / Received: 12.03.2024 Kabul / Accepted: 15.07.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1449020

maliyetli ve kolay ulaşılabilir olması aygıt uygulamalarında çokça tercih edilmesinin nedeni olarak görülebilir. Bununla birlikte, optoelektronik aygıt tasarımlarında silikona kıyasla daha yüksek elektron ve boşluk hareketliliği [12] ve daha büyük Bohr yarıçapına sahip olması [13] gibi nadir elektronik özellikleri nedeniyle germanyumun ilginç bir seçenek olabileceği unutulmamalıdır. Örneğin; lityum iyon piller ile ilgili son yıllarda yapılan çalışmalarda germanyumun, daha büyük teorik şarj-deşarj kapasitesi ile grafit ve oda sıcaklığında yüksek lityum iyon difüzyonu sayesinde de silisyuma rakip olan umut verici bir anot malzemesi olduğu bildirilmiştir [14, 15]. Ayrıca, germanyum nano yapılar yeni nesil alan etkili transistörler, fotodetektörler, lazerler gibi çok işlevli cihaz uygulamalarında büyük ilgi görmektedir [16-20].

Germanyum nano yapıların nadir özelliklerinden daha geniş spektrumda faydalanabilmek ve uygulama alanlarını geliştirebilmek için germanyum yüzeylere organik bileşiklerin kimyasal bağlar ile sabitlenebilmesi konusu üzerinde durulması gerekmektedir. Biyolojik moleküllerin konumlarının nanometre düzeyinde modellenmesi ve onların katı bir yüzey üzerinde hareketsiz hale getirilebilmesi (immobilizasyonu) ile ilgili yeni alternatif yöntemlerin geliştirilmesi, hem malzeme bilimi ve hem de biyomedikal uygulamalarında yeni teknolojik gelişmelerin ortaya çıkışını tetiklemektedir [21,22]. Örneğin; çeşitli enzim yapılarının inorganik malzemeler üzerinde immobilizasyonu sağlanarak kimyasal sensörler geliştirilebilmiştir [23]. Antikor ve antijenler, nükleik asitler (DNA, RNA), hücreler ve çeşitli hücresel yapıların yarı iletken bir yüzeye kontrollü bir şekilde bağlanması, bu yüzeylerin biyolojik sinyalleri algılayan yapay biyoreseptörler olarak kullanılmasına da imkân sağlamaktadır [24-28]. Bununla birlikte, literatürde pH duyarlı boya moleküllerinin katı yüzeylere bağlanması ile yüksek performanslı ve hassas pH sensörlerinin üretilebileceğini gösteren pek çok çalışma bulunmaktadır [29]. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre, boya moleküllerinin migrasyonunun önlenmesi ve yüksek duyarlılığa sahip bir sensör üretilebilmesi için boya moleküllerinin yüzeye kimyasal olarak bağlanması elzemdir [30-32]. Son yıllarda, güneş hücrelerinin yapısında alkalasilane bir ara yüzeyin kullanılmasının hücre verimliliğinin ve yüzey kararlılığının artırılabilmesi üzerindeki etkileri incelenmektedir. Meroni ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada TiO₂ yüzeyinin alkalasilane ile fonksiyonel hale getirilmesinin güneş hücresinde gerçekleşen foton içeren oksitlenme sürecini iyileştirdiği hem deneysel hem de teorik olarak gösterilmiştir [33]. Hafeez ve ark. ise benzer bir çalışmayı amorf silisyum ince film hücreleri üzerinde gerçekleştirmiştir [34]. Elde edilen sonuçlar, silisyum güneş hücresinde n tipi tabakalar yerine toksik olmayan alkalasilane ara yüzeyinin yerleştirilmesinin hücrenin Schottky bariyerini azaltarak fotoakım verimliliğini %7.68 oranında iyileştirdiğini göstermektedir.

Organik moleküllerin katı yüzeyler üzerinde sabitlenmesini ve kararlı yüzeyler oluşturabilmesi için ilgili yüzeyler alkalasilane molekülleri ile iyileştirilmektedir. Silanizasyon olarak adlandırılan bu işlemde en yaygın olarak tercih edilen alkalasilane molekül ise APTES'tir [35].

APTES moleküllerinin ucunda bulunan NH₂ grupları sayesinde organik moleküller kolayca yüzeye tutunabilirler [36]. APTES moleküllerinin farklı şekil ve boyutlardaki silisyum yarı iletken yüzeylerine bağlanmasını inceleyen pek çok çalışma yapılmıştır. Literatürde APTES kullanılarak gözenekli silisyum yüzeylerinin daha fonksiyonel bir yapıya nasıl dönüştürülebileceğini ve bu yüzeylerin biyosensör uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılabileceğini açıklayan çalışmalar bulunmaktadır [37-41]. Benzer şekilde, silanizasyon işlemine tabi tutulan silisyum ve silisyum dioksit nano parçacıkların çekme mukavemeti ve aşınma direncinin arttığı, metal iyonları için büyük absorpsiyon kapasitesi sergilediği, tepki süresi kısa olan kimyasal sensör uygulamalarında kullanılabilmesi ve medikal uygulamalarda ilaç taşıyıcı nano sistemler görevini başarıyla üstlenebileceği de görülmektedir [42-44]. Nano yapılar söz konusu olduğunda ilk aklı gelen ve geniş yüzey alanı sayesinde pek çok aygıt uygulamasında kendini gösteren silisyum nano teller üzerinde de aygıt performansını arttırmak amacıyla APTES uygulamasının yapılabileceği görülmektedir [45-47]. Literatürde silisyum yarı iletken yüzeylerin silanizasyonu üzerine bu kadar çok çalışma ve uygulama bulunmasına rağmen, germanyum yarı iletken yüzeylerinin silanizasyonu ile ilgili sadece birkaç araştırma vardır. Bu çalışmalardan ilki 1989 yılında Weigel ve Kellner tarafından germanyum kristal yapılar üzerinde gerçekleştirilmiştir [23]. Laumier ve arkadaşları tarafından yapılan güncel bir çalışmada ise germanyum nano tel tabanlı diyotların üretilmesi, germanyum yüzeyinin silanizasyonu ve bu yüzeylerin biyosensör olarak kullanılması incelenmiştir [48].

Bu çalışmada ise homojen germanyum piramit dizilerinin APTES molekülü ile silanizasyon süreci incelenmiştir. Germanyum piramit dizilerinin üretilmesi için ise çift hücreli elektrokimyasal aşındırma yöntemi tercih edilmiştir. Litografi, moleküler ışın epitaksi ve lazer ablasyonu gibi diğer yöntemler ile kıyaslandığında çift hücreli elektrokimyasal aşındırma kolay ve oldukça az maliyet gerektiren bir yöntemdir. Aynı zamanda, çift hücreli elektrokimyasal aşındırma akım yoğunluğu, aşındırma süresi, asit konsantrasyonu ve aydınlatma kaynağı gibi çok sayıda kontrol parametresine sahip bir yöntemdir. Her bir kontrol parametresini değiştirerek yarı iletken yüzeyinde farklı şekil ve boyutlarda nano yapılar üretilebilmektedir. Germanyum piramit yapılar günümüzde pek çok kullanım alanında potansiyel malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. Örneğin, geniş yüzey alanı ve iyileştirilmiş ışık absorpsiyonu sayesinde germanyum piramit yapılar ile üretilen güneş hücrelerin de verimlilik önemli ölçüde artmaktadır [49,50]. Aynı zamanda, germanyum piramit dizileri fotodetektörlerde yüksek hassasiyet ve algılama kapasitesi gibi avantajlar sunabilmektedir [51]. Germanyum piramitlerin orta kızıl ötesi bölgede ayarlanabilir antirefleksiyon özelliği sergilediği de görülmektedir [52]. Biyolojik ve kimyasal sensörlerde kullanımı için ise biyolojik moleküllerle etkileşimlerini arttıracak şekilde yüzey modifikasyonlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, APTES moleküllerinin germanyum yüzeyine kimyasal olarak sıkıca bağlanabilmesi ve bu yüzeylerin

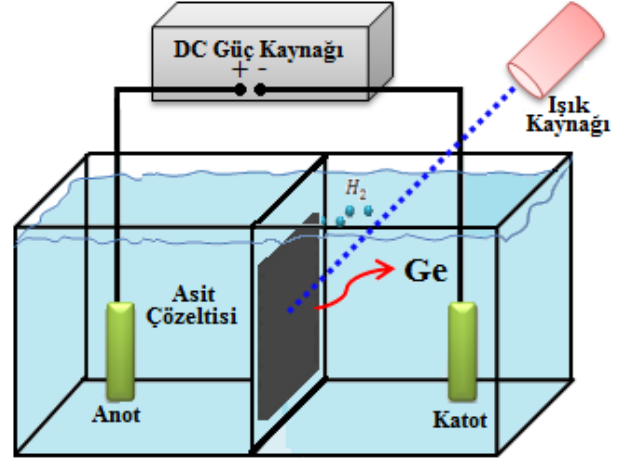
çeşitli sensör uygulamalarında rahatlıkla kullanılabilmesi amacıyla bir ön çalışma yapılmıştır. Başarılı bir silanizasyon süreci için gerekli çözelti konsantrasyonu ve sıcaklık gibi optimum parametreler belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca APTES uygulanan germanyum yüzeyine difluoro {2-[1-(3,5-dimethyl-2H-pyrrol-2-ylidene-N)ethyl]-3,5-dimethyl-1H-pyrrolato-N}boron (BODIPY) organik boya molekülleri kimyasal olarak bağlanmış ve bu boya moleküllerinin optik karakterizasyonu FLIM mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir. Literatürde, homojen germanyum piramitler içeren bir yarı iletken yüzeyin APTES molekülleri ile nasıl daha fonksiyonel hale getirilebileceğini ve bu yüzeylere yüksek floresan ışımaya özelliği sergileyecek şekilde boya moleküllerinin nasıl yerleştirilebileceğini gösteren bir bilimsel çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmamız, çift hücreli elektrokimyasal aşındırma yöntemi ile üretilen Ge piramit yüzeyinin hızlı ve kolay bir şekilde daha fonksiyonel hale dönüştürüleceğini ispatlayarak literatüre özgün bir katkı sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar mikro ve nano yapıları germanyum yarı iletken yüzeyler ile üretilen aygıt teknolojisi için önemli bir ön çalışma niteliğindedir.

2 Materyal ve metod

2.1 Çift hücreli elektrokimyasal aşındırma yöntemi

Antimon (Sb) atomları ile katılanmış ve direnç değeri 0,01 Ω cm olan germanyum yarı iletken plakalar üzerinde sürekli forma sahip kare tabanlı piramit yapıların üretilmesi için çift hücreli elektrokimyasal aşındırma yöntemi kullanılmıştır. VGF (Vertical Grating Freeze) büyütme yöntemi ile üretilmiş olan germanyum plakalar MTI Corporation (Richmond, CA, USA) firmasından satın alınmıştır. Çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlar olan n-tipi germanyum plakalar (100) kristal yönelimine sahiptir. Çift hücreli elektrokimyasal aşındırma yönteminin şematik bir gösterimi Şekil 1’de verilmiştir. Bu işlemde iki özdeş asit hücresi arasına yerleştirilen yarı iletken plakalar uygun elektrolit çözeltisi içinde uygulanan elektrik akımı yardımıyla aşındırılmaktadır. Yarı iletken yüzey üzerinden akım geçişini sağlamak üzere her iki asit hücresine artı ve eksi kutup başları olarak aynı boyutta platin levhalar yerleştirilmiştir. İki asit hücresinin arasına yerleştirilen germanyum plaka asit hücrelerinin birbirinden izole edilmesini sağlanmaktadır. Her iki asit hücresi içine de özdeş konsantrasyonda %48’lik hidroflorik (HF) asit ve %99,999’luk Etanol (C_2H_5OH) çözeltisi yerleştirilmiştir. Yarı iletken yüzeyinde anodik çözünmenin gerçekleşmesi için pozitif yüklü boşluklara gerek duyulmaktadır. Germanyum plaka yüzeyinde pozitif yüklü boşlukların oluşabilmesi için aşındırma boyunca numunenin ön yüzeyi 470 nm dalgaboyuna sahip darbeli lazer ile aydınlatılmıştır. Kullanılan lazerin darbe tekrarlama frekansı 80 MHz ve darbe aralığı 70 ps’dir. Aydınlatma alanı 8 mm² olan lazerin ışığının birim yüzeye sağladığı güç 30 mW/cm²’dir. Yarı iletken yüzeyinden mA mertebesindeki akım geçirilmesi yeterli olacaktır. Bu yöntem ile aşındırma süresi, akım yoğunluğu ve aydınlatma kaynağına bağlı olarak, germanyum plaka yüzeyinde farklı boyutlarda piramitler oluşturulabilmektedir [53]. Benzer bir çalışma grubumuz tarafından p-tipi germanyum plakalar üzerinde de

denenmiştir. Akım yoğunluğu, aşındırma süresi ve asit konsantrasyonuna bağlı olarak farklı boyutta germanyum piramit yapıları p- tipi germanyum yüzeyinde oluşturulmuştur [54].



Şekil 1. Çift hücreli elektrokimyasal aşındırma yöntemi

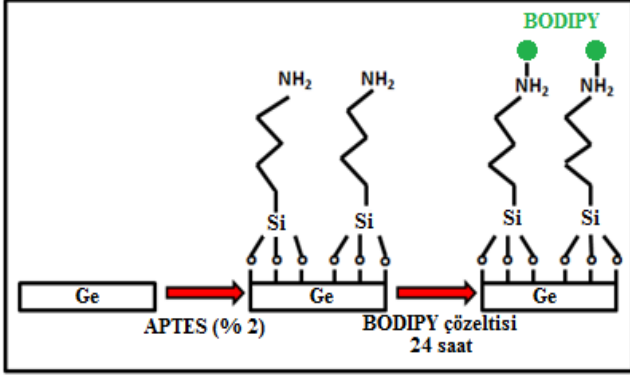
2.2 Germanyum piramitlerin APTES molekülleri aracılığıyla silanizasyonu

Elektrokimyasal aşındırma yöntemi ile üretilen germanyum piramitlerin daha fonksiyonel bir forma dönüştürülebilmesi için APTES molekülleri ile yüzey silanizasyonu gerçekleştirilmiştir. APTES Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiştir. Silanizasyon sürecinde Şekil 2’de özetlenen işlemler sırayla uygulanmıştır. İlk olarak 10 mL toluen içinde 0.2 mL APTES çözülerek %2 lik derişimde bir APTES çözeltisi hazırlanmıştır. Optimizasyon işlemleri yığınsal germanyum plakalar üzerinde yapılmıştır. Yığınsal germanyum plakalar APTES çözeltisi içerisinde bekletilerek silanizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Germanyum yüzeylerin çözelti içinde bekleme süresi ve çözelti sıcaklığı silanizasyon sürecini etkileyen iki önemli parametredir. Çözelti içinde bekleme süresinin APTES moleküllerinin yüzeye kimyasal olarak bağlanması üzerindeki etkisini belirleyebilmek amacıyla dört farklı bekleme süresi için silanizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Çözelti sıcaklığının etkisini görmek için ise oda sıcaklığı (25 °C) ve 60 °C olmak üzere iki farklı çözelti kullanılmıştır. APTES çözeltisinden çıkarılan numuneler toluen içinde 2 dk bekletilerek yüzeye kimyasal olarak tutunamayan APTES moleküllerini temizlenmiştir. Numune yüzeyinin bağlanamayan APTES moleküllerinden tamamen arındırılması için bu işlem iki kez tekrar edilmiştir. Son olarak germanyum plakalar 30 dk boyunca 110 °C’ de fırında kurutulmuştur.

2.3 BODIPY moleküllerinin germanyum piramitlere bağlanması

Germanyum yüzeyine tutunan APTES moleküllerinin ucundaki NH₂ gruplarına BODIPY boya molekülleri kimyasal olarak bağlanmıştır. BODIPY boya molekülleri Sigma-Aldrich firmasından satın alınmıştır. Derişimi 4×10⁻⁴ M olan BODIPY-metanol çözeltisi hazırlanmıştır ve APTES ile kaplanan numuneler bu boya çözeltisi içerisinde 24 saat boyunca oda sıcaklığında ve karanlık bir ortamda

bekletilmiştir. Son olarak germanyum yüzeyine kimyasal olarak tutunamayan boya moleküllerinin yüzeyden uzaklaştırılması için numuneler 5 dk metanol içerisinde bekletilmiştir.



Şekil 2. Ge plakaların silanizasyonu ve BODIPY boya moleküllerinin bağlanması

2.4 FLIM mikroskobu ile germanyum yüzeylerin karakterizasyonu

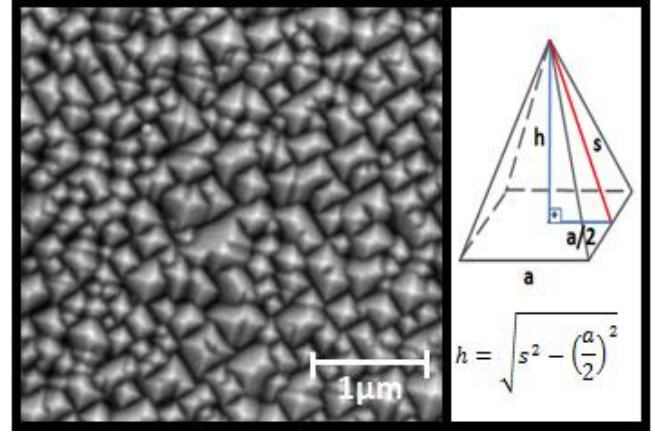
Yarı iletken yüzeylerin optik karakterizasyonu floresan yaşam ömrü görüntüleme mikroskobu (FLIM) ile yapılmıştır. FLIM mikroskobunun çalışma prensibi daha önceki bir çalışmamızda detaylı bir şekilde anlatılmıştır [55]. Bu görüntüleme tekniği sayesinde yüzeyde bulunan floresan moleküllerin hem ışın şiddeti hem de yaşam ömrü eş zamanlı olarak ölçülebilmektedir. FLIM mikroskobunda, piko saniye atımlı ve dalga boyu 470 nm olan bir darbeli lazer (Picoquant, LDH-C-D-470) ışık kaynağı olarak kullanılmıştır. FLIM mikroskobu ile görüntülenecek germanyum yüzeyler nanometre mertebesinde hareket hassasiyetine sahip özel bir piezo tabla (PI, P-733.2CD) üzerine yerleştirilir. Bu piezo tabla sayesinde 100X100µm genişliğine kadar iki boyutlu yüzey taraması yapılabilmektedir. Zaman uyumlu tek foton sayma tekniğinin kullanıldığı bu FLIM mikroskobunda foton sayma cihazı olarak PicoHarp-300 (Picoquant) kullanılmaktadır. Floresan ışın verilerin toplanması ve analizi ise SymphoTime 64 bilgisayar yazılımı (Picoquant) ile yapılmaktadır. El yapımı FLIM mikroskobumuza ilave ettiğimiz bir USB4000-VIS-NIR fiber optik spektrometre (Ocean Optics) sayesinde de germanyum yüzeyine bağlanan BODIPY boya moleküllerinin görünür bölgedeki foto ışın spektrumları tespit edilmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Germanyum piramitlerin üretilmesi

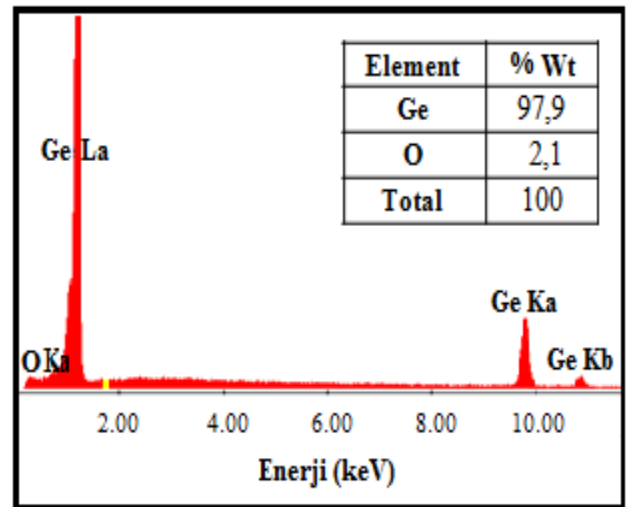
N-tipi germanyum plakalar üzerinde homojen ve sürekli bir forma sahip germanyum piramitler çift hücreli elektrokimyasal aşındırma yöntemi ile üretilmiştir. Aşındırma işlemi hacimce (1:3) oranında HF ve Etanol çözeltisi içinde gerçekleştirilmiştir. Aşındırma esnasında germanyum plaka yüzeyinden 20 mA/cm² yoğunluğunda sabit DC akım geçirilmiştir. Aşındırma işlemi 90 dk sürmüştür. Üretilen numunenin yüzey morfolojisi alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FESEM) ile

incelenmiştir. Numune yüzeyine ait FESEM resmi Şekil 3'te verilmiştir. FESEM analizi numune yüzeyinde sürekli forma sahip kare tabanlı piramitlerin oluştuğunu açıkça göstermektedir. Ortalama piramit boyutunu belirlemek için Imaje J bilgisayar programı kullanılmıştır. FESEM görüntüsü üzerinden seçilen 20 farklı piramidin boyutları ölçülmüş ve kare tabanlı piramitler için ortalama taban uzunluğu (a) 195 nm ve ortalama piramit yüksekliği (h) 88 nm olarak hesaplanmıştır. Yapılan yüzey analizleri germanyum yarı iletken yüzeyinde nano boyutta piramitlerin üretilmiş olduğunu göstermektedir.



Şekil 3. Ge piramitlerin FESEM resmi

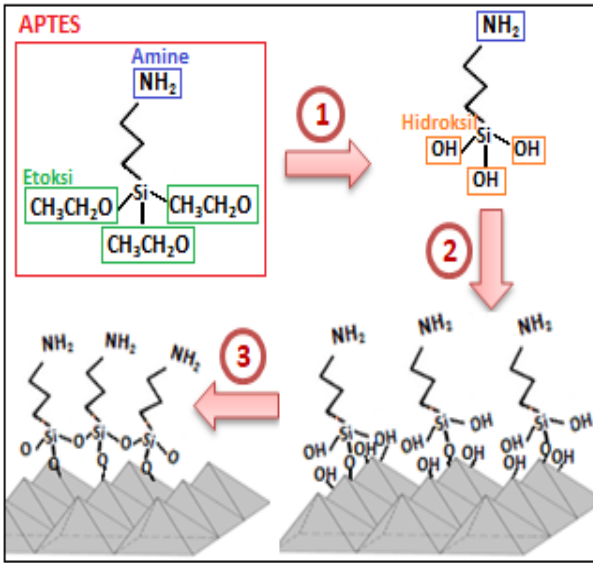
Germanyum plaka üzerinde üretilen nano piramitlerin kimyasal yapısı ise Enerji Dispersiv Spektrum (EDS) yöntemiyle incelenmiştir. Nano piramitlerden elde edilen EDS spektrumu Şekil 4'te verilmiştir. EDS spektrumuna göre yüzey ağırlıkça %97,9 oranında germanyum ve %2,1 oranında oksijen atomları ihtiva etmektedir. Elde edilen sonuçlar, nano piramitlerin tamamen germanyum atomlarından oluştuğunu açıkça göstermektedir. Yüzeyde tespit edilen düşük orandaki oksijen ise numune yüzeyinin hava ile teması sonrasında yüzeyin oksitlenmesinden kaynaklandığı söylenebilir.



Şekil 4. Ge piramitlerin EDS analizi

3.2 APTES moleküllerinin Germanyum yüzeyine kimyasal bağlanma süreci

Germanyum yarı iletken yüzeylerin fonksiyonel hale getirilebilmesi için yüzeylere APTES molekülleri kimyasal olarak bağlanmaya çalışılmıştır. Her bir APTES molekülü üç fonksiyonel reaktif etoksi grup (-CH₂CH₂O) ve bir amine grup (-NH₂) içermektedir. Şekil 5'te görüldüğü gibi APTES moleküllerinin bir yüzeye kovalent bağlanması üç aşamada gerçekleşen karmaşık bir süreçtir [26, 56, 57]. İlk aşamada APTES molekülünde bulunan etoksi gruplarının yerine hidroksil grupları (-OH) geçer. İkinci aşamada komşu APTES molekülleri arasında siloksan (Si-O-Si) bağları kurulur. Son aşamada ise faz ayrışması meydana gelir. Yüzeye tutunan APTES moleküllerinin amine grupları ise açıkta kalır. Açıkta kalan amine grupları yüzeyin fonksiyonel hale gelmesini ve farklı türden organik moleküllerin yüzeye kolayca tutunabilmesini sağlar. Görüldüğü gibi silanizasyon işlemi karmaşık bir reaksiyon dizisine bağlıdır. Numune yüzeyinde homojen ve ince bir APTES film tabakası oluşturulması için ortam nemi, çözücü tipi, pH, reaksiyon sıcaklığı ve süresi gibi reaksiyon koşullarının iyi kontrol edilmesi ve optimizasyonunun sağlanması gerekmektedir.



Şekil 5. APTES'in Ge piramitlere kimyasal bağlanması

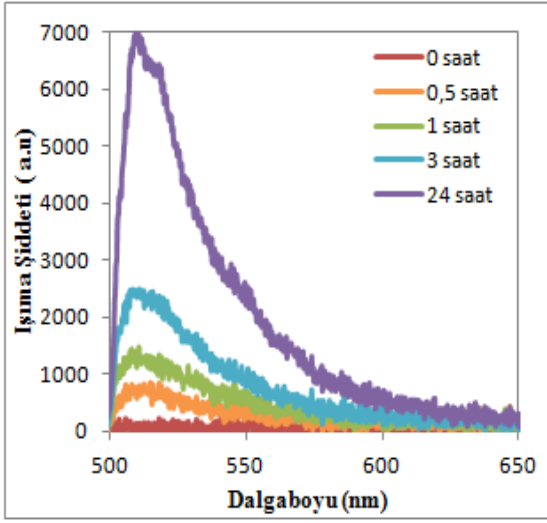
APTES moleküllerinin yüzeye kimyasal bağlanmasını etkileyen önemli faktörlerden biri kullanılan çözücü tipidir. APTES molekülleri etanol, metanol, aseton, su ve toluen gibi çözücülerden herhangi biri yardımıyla yüzeye uygulanabilmektedir. En çok tercih edilen çözücü ise toluendir. APTES bağlanan yüzeylerin CO₂ absorpsiyonu ile ilgili yapılan bir çalışmada, toluen ile hazırlanan yüzeylerin etanol ile hazırlanan yüzeylerden çok daha fonksiyonel olduğu ve daha çok gaz absorbe edebildiği görülmüştür [58]. Z. Xu ve arkadaşları tarafından yapılan başka bir çalışmada ise silanizasyon işleminde su ve toluen kullanımı karşılaştırılmıştır [59]. Elde edilen sonuçlara göre toluen kullanımı daha stabil bir yüzey elde edilmesine olanak sağlamıştır. Su moleküllerinin varlığı silanizasyon işlemi

esnasında gerçekleşen hidroliz olayını kolaylaştırır da, fazla su kullanılması APTES moleküllerinin yüzeye zayıf bir şekilde bağlanmasına ve yüzey stabilizasyonunun azalmasına neden olur. Silanizasyon işleminde toluen gibi susuz bir çözücünün tercih edilmesi numune yüzeyinde yüksek yoğunluklu, homojen ve pürüzsüz bir film şeklinde APTES tabakasının oluşmasını sağlar [26, 60]. Yukarıda belirtilen nedenler dikkate alınarak, bu çalışmamızda homojen ve kararlı bir APTES tabakası oluşturmak için APTES çözeltisi hazırlanırken toluen kullanılmıştır.

3.3 APTES çözeltisinde bekleme süresinin etkisi

Numune yüzeyinde homojen bir APTES tabakası oluşmasını sağlayan önemli faktörlerden biri reaksiyon süresidir. Yarı iletken yüzeylerin APTES çözeltisi içinde bekleme süresi yüzeye tutunan APTES molekülü miktarını doğrudan etkilemektedir. Bu konuda silisyum nitrür yarı iletkeni ile ilgili yapılan bir çalışmaya göre yüzeyde oluşan APTES tabakasının kalınlığı doğrudan reaksiyon süresine bağlıdır [61]. Silisyum kaplı manyetik nano parçacıkların APTES molekülleri ile modifiye edilmesi ve manyetik bioseparator olarak kullanılması hakkında yapılan bir çalışmada da, APTES çözeltisi içinde bekleme süresinin artmasının nano parçacık yüzeyine tutunan amine grup yoğunluğunu arttırdığı belirtilmiştir [62]. Kristal silisyum yüzeyine APTES moleküllerinin bağlanması ve silisyum yüzeyinin silanizasyonu ile ilgili başka bir çalışmada Howarter ve Youngblood tarafından yapılmıştır [63]. Diğer çalışmalarda olduğu gibi APTES içinde bekleme süresinin yüzeyde oluşan film kalınlığının artmasına neden olduğu sonucuna varılmıştır. Silisyum temelli farklı türden yüzeylerin silanizasyonu ve bu süreçte APTES içinde bekleme süresinin etkisini açıklamaya çalışan daha pek çok çalışma yapılmıştır. Ancak, literatürde germanyum piramit yüzeyinin silanizasyon sürecinde bekleme süresinin etkisini inceleyen herhangi bir çalışma bulunmamaktadır.

Yüzey ajanı olarak çalışacak ve germanyum yüzeylere farklı türden organik moleküllerin bağlanmasını kolaylaştıracak olan APTES molekülleri öncelikle yığınsal germanyum plakalar üzerinde uygulanmıştır. Yığınsal germanyum plakalar oda sıcaklığında %2 derişime sahip olan APTES çözeltisi içinde dört farklı sürede (0,5, 1, 3 ve 24 saat) bekletilmiştir. APTES moleküllerinin yüzeye kimyasal olarak bağlanmasından sonra germanyum plakalar oda sıcaklığında BODIPY organik boya çözeltisi içinde bekletilerek boya moleküllerinin germanyum yüzeye APTES aracılığı ile tutunması sağlanmıştır. Farklı sürelerde APTES çözeltisinde bekletilen ve BODIPY bağlanan yığınsal germanyum plakaların foto ışına spektrumları Şekil 6'da verilmiştir. Foto ışına spektrumlarına göre, numunelerin çözelti içinde bekleme süresinin artması yüzeye tutunan APTES molekülü sayısını önemli ölçüde etkilemiştir. APTES çözeltisi içinde bekleme süresi arttıkça BODIPY boya moleküllerinden elde edilen floresan ışına şiddeti doğrusal olarak artmıştır. 24 saat bekleme süresinin yığınsal germanyum yüzeyinde belirgin bir APTES tabakası oluşturduğu ve APTES moleküllerine kimyasal olarak tutunan BODIPY boya moleküllerinin yüksek şiddette bir floresan ışına verdiği açıkça görülmüştür.



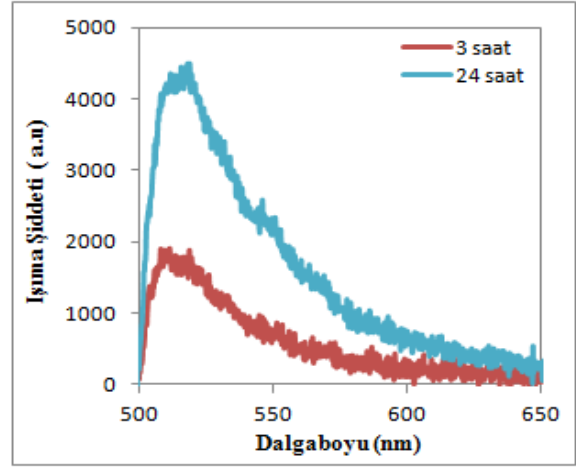
Şekil 6. Oda sıcaklığında farklı sürelerde APTES çözeltisinde bekletilen ve BODIPY bağlanan yığınsal Ge plakaların foto ışımaya spektrumları

Yığınsal germanyum plakalar ile yapılan denemelerden sonra yüzeyinde piramitler bulunan germanyum plakalar için de APTES çözeltisinde bekleme süresinin etkisi incelenmiştir. Yüzeyinde piramit içeren germanyum plakalar oda sıcaklığında %2 derişime sahip olan APTES çözeltisi içinde 3 ve 24 saat olmak üzere iki farklı sürede bekletilmiştir. Farklı sürelerde APTES çözeltisinde bekletilen ve BODIPY bağlanan germanyum piramitlerin foto ışımaya spektrumları Şekil 7’de verilmiştir. BODIPY boya moleküllerinin foto ışımaya spektrumlarına göre, APTES içinde bekleme süresinin artması germanyum piramit yüzeyine bağlanan APTES ve buna bağlı olarak BODIPY boya moleküllerinin artmasına neden olmuştur. 24 saatlik bekleme süresinde yeterli miktarda foto ışımaya elde edilmiştir. 24 saat APTES içinde bekletilen yığınsal ve piramit içeren germanyum yüzeylerin foto ışımaya spektrumları karşılaştırılacak olursa, yığınsal germanyum yüzeye APTES moleküllerinin daha kolay tutunabildiği söylenebilir. Yüzeyin eğriliğinin artması APTES tutunma oranının azalmasına neden olmuş ve foto ışımaya şiddeti düşmüştür.

3.4 APTES çözelti sıcaklığının etkisi

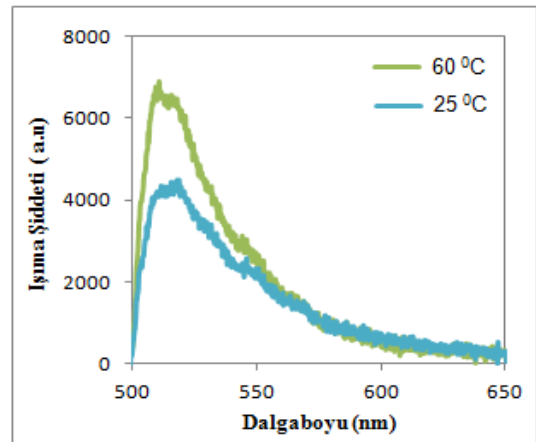
APTES çözeltisinin sıcaklığı numune yüzeyinde homojen bir APTES tabakası oluşmasını sağlayan diğer önemli faktördür. Langmuir ve arkadaşları tarafından silisyum yüzeyinin APTES molekülleri ile silanizasyonu ve çözelti sıcaklığının bu sürece etkisi hakkında çok sayıda araştırma yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre çözelti sıcaklığının artırılması silanizasyon sürecini olumlu yönde etkilemiştir. Reaksiyon sıcaklığının artmasının çözelti içinde ve yarı iletken yüzeyinde silanol yoğunlaşmasını kolaylaştırdığı görülmüştür. Ayrıca artan termal enerji silanol-protik çözelti kompleks moleküllerinin oluşmasını engelleyerek silanol-yüzey etkileşimini olumlu yönde etkilemiştir [62]. Yüksek sıcaklıkta, toluen fazı içindeki APTES moleküllerinin hareketliliği arttığı ve böylece silanizasyon reaksiyonu hızlandığı tespit edilmiştir. Yüzeyde

ilk önce ince bir film şeklinde oluşan APTES tabakası hızlıca kalınlaşmıştır [63].



Şekil 7. Oda sıcaklığında farklı sürelerde APTES çözeltisinde bekletilen ve BODIPY bağlanan Ge piramitlerin foto ışımaya spektrumları

Bu çalışmada, silisyum ile ilgili literatürden elde edilen veriler ışığında germanyum piramitlerin silanizasyon sürecinde sıcaklığın etkisi incelenmiştir. Silanizasyon süreci oda sıcaklığı (25 °C) ve 60 °C olmak üzere iki farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Her iki sıcaklıktaki silanizasyon işleminde germanyum piramit içeren yüzeyler 24 saat boyunca APTES çözeltisi içinde bekletilmiştir. Silanizasyon işlemleri tamamlandıktan sonra germanyum yüzeyler BODIPY boya çözeltisi içinde 24 saat boyunca bekletilmiş ve böylece yüzeyler BODIPY floresan boya ile etiketlenmiştir. Boya bağlanan germanyum piramitlerden ışımaya spektrumları Şekil 8’de verilmiştir. Beklenildiği gibi, yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen silanizasyon işlemi yüzeye daha çok APTES molekülü tutunmasını sağlamış ve bu numuneden alınan foto ışımaya şiddeti daha fazla olmuştur. Silisyuma benzer şekilde germanyum yüzeylerin silanizasyon işleminde de yüksek sıcaklık tercih edilmelidir.



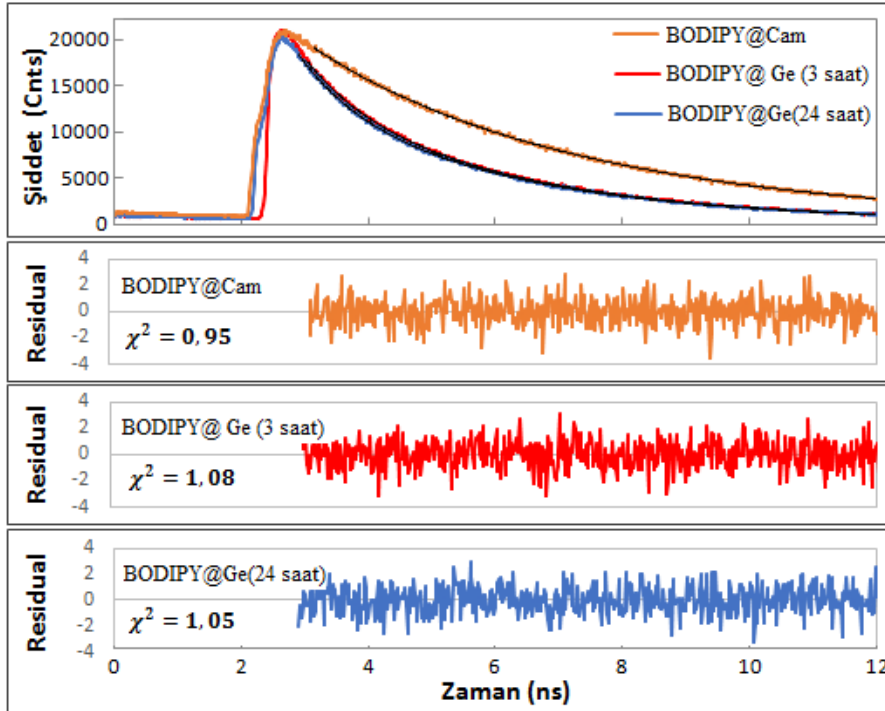
Şekil 8. Farklı sıcaklıklarda APTES çözeltisinde 24 saat boyunca bekletilen ve BODIPY bağlanan Ge piramitlerin foto ışımaya spektrumları

3.5 APTES bağlanan germanyum yüzeylerin FLIM analizleri

BODIPY gibi organik boya moleküllerinin floresan yaşam ömrü içinde ya da üzerinde buldukları ortama göre değişmektedir. APTES aracılığıyla germanyum yüzeyine bağlanan BODIPY moleküllerinin floresan yaşam ömründeki değişim FLIM mikroskobu ve tek foton sayma tekniği ile incelenmiştir. Yığmsal germanyum ve cam yüzeyine kimyasal olarak yerleşen boya moleküllerinin yaşam ömrü kıyaslanmıştır. BODIPY boya molekülünün serbest uzaydaki yaşam ömrünü belirlemek üzere germanyum yüzeylerde kullanılan aynı konsantrasyonda ki boya çözeltisi cam yüzeyine uygulanmış ve yaşam ömrü ölçülmüştür. Cam ve yığmsal germanyum yüzeylerden alınan zamana bağlı foto ışımaya eğrileri Şekil 9’da verilen grafikte kıyaslanmıştır. Foto ışımaya eğrileri SymPhoTime 64 bilgisayar programı kullanılarak üstel fonksiyonlar yardımıyla analiz edilmiş ve elde edilen foto ışımaya parametreleri Tablo 1’de özetlenmiştir. Cam yüzeyindeki BODIPY boya moleküllerinin yaşam ömrü 4,461 ns olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte yığmsal germanyum plaka yüzeyine bağlanan boya moleküllerinin yaşam ömrünün önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Bu azalmanın nedeni germanyum yarı iletkeninin enerji seviyeleri ile uyarılan BODIPY boya moleküllerinin LUMO enerji seviyeleri arasında gerçekleşen enerji ve elektron transfer süreçleri

olarak görülebilir. Işımasız gerçekleşen bu geçişler boya moleküllerinin foto ışımaya karakterini ve ışımaya parametrelerini doğrudan etkilemektedir. Diğer taraftan, yapılan yaşam ömrü hesaplarında APTES çözeltisi içinde bekleme süresinin boya moleküllerinin zaman uyumlu foto ışımaya eğrileri üzerinde bir etkisi olmadığı görülmüştür. APTES uygulama süresi 3 ve 24 saat olan her iki germanyum yüzeyinde de BODIPY moleküllerinin floresan yaşam ömrü yaklaşık 2,72 ns olarak hesaplanmıştır.

Tek nokta yaşam ömrü ölçümlerinin yanı sıra, BODIPY boya molekülleri ile işaretlenen germanyum piramit yüzeyler FLIM tekniği ile de incelenmiştir. FLIM tekniğinde eş zamanlı olarak numune yüzeyinde pek çok farklı noktada yaşam ömrü ölçümü yapılır ve elde edilen veriler SymPhoTime 64 bilgisayar programı ile iki boyutlu bir resim üzerinde birleştirilir. FLIM analizinde numune yüzeyinde hem ışımaya şiddetine hem de floresan yaşam ömrüne bağlı resimler elde edilebilmektedir. Işıma şiddetine bağlı FLIM resimlerinde siyah ve beyaz olmak üzere iki renk kullanılmaktadır. Beyaz olan kısımlar ışımaya şiddetinin yüksek olduğu yerleri göstermektedir. Yaşam ömrüne bağlı FLIM resimlerinde ise mavi, yeşil, sarı ve kırmızı olmak üzere dört ana renk kullanılmaktadır. Yaşam ömrü değerine göre resim üzerindeki renk kodu değişmektedir. FLIM resimlerinin yanında verilen renk skalasında hangi rengin hangi yaşam ömrü değerini temsil ettiği belirtilmektedir.



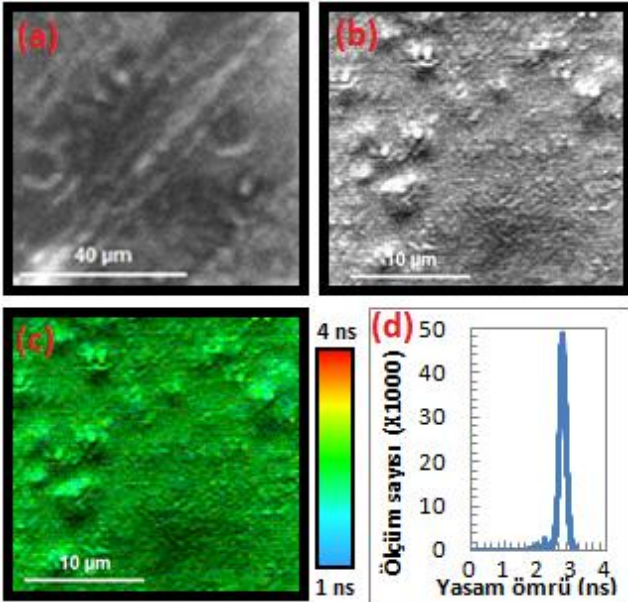
Şekil 9. Cam ve Ge yüzeyine bağlanan BODIPY boya moleküllerinin foto ışımaya yaşam ömrü eğrileri

Tablo 1. Cam ve Germanyum yüzeylere bağlanan BODIPY moleküllerinin foto ışımaya eğrisi parametreleri

	A_1 (kCounts)	τ_1 (ns)	A_2 (kCounts)	τ_2 (ns)	$\bar{\tau}$ (ns)	χ^2
Cam	9,49	4,725	1,12	2,230	4,461	0,95
Ge (APTES-3 saat)	12,85	3,350	4,59	0,956	2,720	1,08
Ge(APTES-24 saat)	14,32	3,313	4,48	0,859	2,728	1,05

Öncelikle, oda sıcaklığında 3 saat APTES çözeltisi içinde kalan numunenin FLIM analizi gerçekleştirilmiştir. Bu numune üzerinden elde edilen ışımaya şiddetine bağlı FLIM resmi Şekil 10 (a)'da verilmiştir. FLIM resmi incelendiğinde yüzeyin net bir görüntüsünün elde edilemediği ve yüzeydeki piramit yapısının tam olarak görüntülenmediği söylenebilir. İkinci olarak, oda sıcaklığında 24 saat boyunca APTES içinde bekletilen numunenin FLIM analizi yapılmıştır. Bu numuneye ait ışımaya şiddetine ve floresan yaşam ömrüne bağlı FLIM resimleri Şekil 10 (b) ve (c)'de sırasıyla görülmektedir. APTES çözeltisinde bekleme süresinin artması FLIM resimlerinin çözünürlüğünün artmasına neden olmuştur ve daha iyi bir yüzey görüntüsü elde edilmiştir. Ancak hala germanyum piramit yüzeyler yeterli çözünürlükte görüntülenememiştir. FLIM resminin yanında verilen renk skalası ve Şekil 10 (d)'de verilen yaşam ömrü histogramına göre yüzey üzerindeki ortalama yaşam ömrü 2,7 ns civarındadır. Floresan yaşam ömrü histogramı numune yüzeyinde hangi yaşam ömrü değerinin kaç kez ölçüldüğünü gösteren bir grafikdir.

Son olarak, 60 °C'de 24 saat APTES içinde bekletilerek hazırlanan numunenin FLIM analizi yapılmıştır. Elde edilen ışımaya şiddetine ve yaşam ömrüne bağlı FLIM resimleri Şekil 11 (a) ve (b)'de verilmiştir. Yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen silanizasyon işleminin yüzey görüntülenmesi açısından olumlu sonuç verdiği açıkça söylenebilir. Işıma şiddetine bağlı FLIM resmine daha küçük ölçekte bakıldığında piramit yapıları net bir şekilde görülmektedir. Şekil 11 (c)'de verilen yaşam ömrü histogramına göre ortalama yaşam ömrü 2,4 ns'dir.



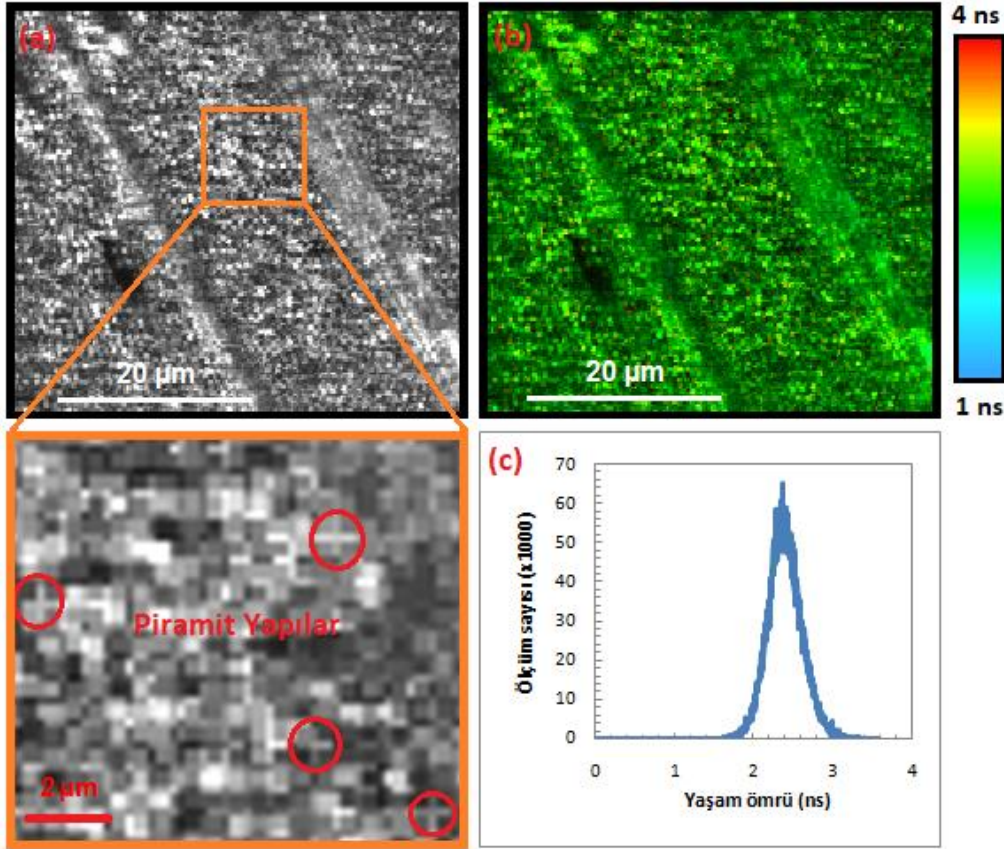
Şekil 10. Oda sıcaklığında (a) 3 saat, (b) 24 saat APTES içinde bekletilen yüzeylerin ışımaya şiddetine (c) yaşam ömrüne bağlı FLIM resmi ve (d) yaşam ömrü histogramı

FLIM tekniği fonksiyonel malzemelerin yüzey analizinde kullanılabilen yeni ve etkin bir yöntemdir. Özellikle yarı iletken malzemelerde yüzey

görüntülenmesinin yanı sıra malzemenin enerji bant yapısı hakkında da fikir sahibi olmamızı sağlayabilir. Yarı iletken yüzeyine yerleştirilen floresan boya molekülleri ile yarı iletkenin iletim ve değerlik enerji bantları arasında ışımaya olarak gerçekleşen enerji ve elektron transfer süreçleri boya molekülünün yaşam ömrünü doğrudan etkiler. Bu etkileşim sürecinde boya moleküllerinin LUMO enerji seviyesi ve yarı iletkenin iletim bandı enerji seviyesi arasındaki enerji farkı önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır [64]. Yarı iletken yüzeyinde üretilen nano boyuttaki yapıların yarı iletkenin enerji bant yapısını değiştirdiği de bilinmektedir [53]. Germanyum piramit yapılarının üzerine yerleştirilen boya moleküllerinin yaşam ömrünün 2,4 ns'ye kısalmasının nedeni de değişen iletim bandı enerji seviyesi olarak görülebilir. Germanyum piramitler ve floresan moleküller arasındaki etkileşimi inceleyen benzer bir çalışmada Shinde ve ark. tarafından yapılmıştır [65]. Bu çalışmada, CdTe kuantum noktaların floresan yaşam ömrü kuartz cam yüzeyinde 7,14 ns olarak ölçülürken germanyum piramit yüzeyinde 1,94 ns ölçülmüştür. Numune yüzeyinde sadece tek noktadan alınan floresan yaşam ömrü değerlerinde görülen bu azalma CdTe kuantum noktalar ve germanyum piramitlerin enerji seviyeleri arasında gerçekleşen ışımaya geçişler ile açıklanmıştır. P-tipi germanyum piramitler ve perilen boya molekülleri arasındaki fotonik etkileşimlerin FLIM tekniği ile incelendiği başka bir çalışmada yine grubumuz tarafından gerçekleştirilmiştir [54]. Farklı boyutlardaki germanyum piramitlerin üzerine yerleştirilen perilen boya moleküllerinin floresan yaşam ömrünün piramit boyutuna bağlı olarak kısaldığı tespit edilmiştir. Literatürde germanyum piramitler ve floresan moleküller arasındaki etkileşimi inceleyen ve germanyum piramitlerin yüzey analizinde FLIM tekniğini kullanan başka bir çalışma bulunmamaktadır. Bu durum ise yapılan bu araştırmanın özgünlüğünün bir göstergesidir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, yığılmalı ve nano piramit yapılı germanyum yarı iletken yüzeylerin APTES yüzey ajanları ile silanizasyon süreci detaylı bir şekilde incelenmiştir. Düzenli nano piramit yapıları içeren germanyum yüzeyler çift hücreli elektrokimyasal aşındırma yöntemi ile üretilmiştir. Germanyum piramitlerin daha fonksiyonel bir yapıya sahip olabilmesi ve çeşitli optoelektronik uygulamalarda kullanılabilmesi için, bu yüzeylere APTES molekülleri kimyasal olarak yerleştirilmiştir. Silanizasyon adı verilen bu işlem esnasında yüzeylerin APTES çözeltisi içinde bekleme süresi ve APTES çözelti sıcaklığının süreç üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yüzeye tutunan APTES moleküllerinin tayini için yüzeyler floresan BODIPY boya molekülleri ile işaretlenmiştir. İşaretlenen numuneler üzerinde hem PL hem de FLIM analizleri yapılmıştır. Numunelerin çözelti içinde bekleme süresinin yüzeye tutunan APTES molekülü miktarının artmasına neden olduğu görülmüştür. Bununla birlikte çözelti sıcaklığının silanizasyon reaksiyon hızını artırarak yüzeye daha çok silane molekülü tutunmasını sağladığı tespit edilmiştir. Foto ışımaya spektrumları ve yapılan FLIM analizlerine göre hem



Şekil 11. 60 °C’de 24 saat APTES içinde bekletilen numunenin (a) ışımaya şiddetine ve (b) yaşam ömrüne bağlı FLIM resimleri, (c) yaşam ömrü histogramı

yığımsal hem de piramit şeklindeki germanyum yüzeylerin fonksiyonel bir yapıya dönüşebilmesi için silanizasyon işleminin 60 °C’de ve 24 saat boyunca gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca germanyum piramit yüzeyine APTES aracılığıyla tutunan BODIPY boya moleküllerinin yaşam ömrünün 2,4 ns’ye kısaldığı görülmüştür. Bu kısalmanın nedeni ise boya molekülleri ve germanyum piramitler arasındaki ışısız enerji ve elektron transferleri olarak görülebilir. Elde edilen bu sonuçlar, hem nano yapılı germanyum yüzeylerin modifikasyonu hem de bu yüzeylerin kullanılabilmesi için pek çok optoelektronik cihazın geliştirilmesi açısından oldukça önem arz etmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 114F451 numaralı proje ve Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi tarafından 16-M-15 numaralı proje ile desteklenmiştir

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

[1] S. Suresh, Semiconductor Nanomaterials, Methods and Applications: A Review. Nanoscience and

- Nanotechnology, 3(3), 62, 2013. <http://article.sapub.org/10.5923.j.nn.20130303.06.html>
- [2] M.F. Al-Hakkani, Biogenic copper nanoparticles and their applications: A review. SN Appl. Sci. 2, 505, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2279-1>.
- [3] S. Zhao, X. Liu, X. Pi and D. Yang, Light-emitting diodes based on colloidal silicon quantum dots. Journal of Semiconductors, 39, 061008, 2018. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/16744926/39/6/061008/meta>.
- [4] B. Das and S.P. McGinnis, Porous silicon pn junction light emitting diodes. Semiconductor Science and Technology, 14, 988, 1999. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/02681242/14/11/308>.
- [5] D.H. Shin, J.H. Kim, J.H. Kim, C. W. Jang, S.W. Seo, H.S. Lee, S. Kim and S.H. Choi, Graphene/porous silicon Schottky-junction solar cells. Journal of Alloys and Compounds, 715, 291, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.05.001>.
- [6] A.K. Katiyar, A.K. Sinha, S. Manna and S.K. Ray, Fabrication of Si/ZnS radial nanowire heterojunction arrays for white light emitting devices on Si substrates. ACS Applied Materials and Interfaces, 6(17), 15007, 2014. <https://doi.org/10.1021/am5028605>.
- [7] S. Kato, Y. Kurokawa, K. Gotoh and T. Soga, Silicon nanowire heterojunction solar cells with an Al₂O₃ passivation film fabricated by atomic layer deposition.

- nanoscale research letters, 14(99), 1, 2019. <https://doi.org/10.1186/s11671-019-2930-1>
- [8] S. Jeong, E.C. Garnett, S. Wang, Z. Yu, S. Fan, M.L. Brongersma, M.D. McGehee and Y. Cui, Hybrid silicon nanocone-polymer solar cells. *nano letters*, 12(6), 2971, 2012. <https://doi.org/10.1021/nl300713x>.
- [9] X. Wang, Z. Liu, Z. Yang, J. He, X. Yang, T. Yu, P. Gao and J. Ye, Heterojunction hybrid solar cells by formation of conformal contacts between PEDOT:PSS and periodic silicon nanopyramid arrays. *Small*, 14(15), 1704493, 2018. <https://doi.org/10.1002/sml.201704493>.
- [10] A.Razzaq, V. Depauw, J. Cho, H.S. Radhakrishnan, I. Gordon, J. Szułfcik, Y. Abdulraheem and J. Poortmans, Periodic inverse nanopyramid gratings for light management in silicon heterojunction devices and comparison with random pyramid texturing. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 206, 110263, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110263>.
- [11] A. Gaucher, A. Cattoni, C. Dupuis, W. Chen, R. Cariou, M. Foldyna, L. Lalouat, E. Drouard, C. Seassal, P.R. Cabarrocas, S. Collin, Ultrathin epitaxial silicon solar cells with inverted nanopyramid arrays for efficient light trapping. *Nano Letters*, 16(9), 5358, 2016. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b01240>.
- [12] B. Yu, X.H. Sun, G.A. Calebotta, G.R. Dholakia and M. J. Meyyappan. One-dimensional germanium nanowires for future electronics. *Journal of Cluster Science*, 17, 579, 2006. <https://doi.org/10.1007/s10876-006-0081-x>.
- [13] H. Gerung, T.J. Boyle, L.J. Tribby, S.D. Bunge, C.J. Brinker and S.M. Han, Solution synthesis of germanium nanowires using a Ge²⁺alkoxide precursor. *Journal of American Chemical Society*, 128, 5244, 2006. <https://doi.org/10.1021/ja058524s>.
- [14] Z. Hu, S. Zhang, C. Zhang and G. Cui, High performance germanium-based anode materials, *Coordination Chemistry Reviews*, 326, 34, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ccr.2016.08.002>.
- [15] S. Wu, C. Han, J. Iocozzia, M. Lu, R. Ge, R. Xu and Z. Lin, Germanium-Based Nanomaterials for Rechargeable Batteries, *Angew. Chem. Int. Ed.* 55, 7898, 2016. <https://doi.org/10.1002/anie.201509651>.
- [16] D. Wang, Y. L. Chang, Q. Wang, J. Cao, D.B. Farmer, R.G. Gordon and H. Da, Surface chemistry and electrical properties of germanium nanowires, *Journal of American Chemical Society*, 126, 11602, 2004. <https://doi.org/10.1021/ja047435x>.
- [17] P. Staudinger, M. Sistani, J. Greil, E. Bertagnolli and A. Lugstein, Ultrascaled germanium nanowires for highly sensitive photodetection at the quantum ballistic limit. *Nano Letters*, 18, 5030, 2018. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.8b01845>.
- [18] F.T. Pilon, A. Lyasota, Y.M. Niquet, V. Reboud, V. Calvo, N. Pauc, J. Widiez, C. Bonzon, J.M. Hartmann, A. Chelnokov, J. Faist and H. Sigg, Lasing in strained germanium microbridges. *Nature Communications*, 10, 2724, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10655-6>.
- [19] M. Grydlik, F. Hackl, H. Groiss, M. Glaser, A. Halilovic, T. Fromherz, W. Jantsch, F. Schaffler and M. Brehm, Lasing from Glassy Ge Quantum Dots in Crystalline Si. *ACS Photonics* 3, 298, 2016. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.5b00671>
- [20] S.K. Ray, A. K. Katiyar and A.K. Raychaudhuri, One-dimensional Si/Ge nanowires and their heterostructures for multifunctional applications-a review. *Nanotechnology*, 28(9), 092001, 2017. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa565c>.
- [21] D.S. Luca, O. Giorgia, A. Jussara, B. Nicola, P. Gennaro, M. Luciano, R. Ivo, T. Monica and R. Ilaria, Aminosilane functionalizations of mesoporous oxidized silicon for oligonucleotide synthesis and detection. *J. R. Soc. Interface*, 10, 83, 2013. <http://doi.org/10.1098/rsif.2013.0160>.
- [22] N. Aissaoui, L. Bergaoui, J. Landoulsi, J.-F. Lambert and S. Boujday, Silane Layers on Silicon Surfaces: Mechanism of Interaction, Stability, and Influence on Protein Adsorption. *Langmuir*, 28(1), 656, 2012. <https://doi.org/10.1021/la2036778>.
- [23] C. Weigel and R. Kellner, FTIR-ATR-spectroscopic investigation of the silanization of germanium surfaces with 3-aminopropyltriethoxysilane. *Z. Anal. Chem.* 335, 663, 1989. <https://doi.org/10.1007/BF01204067>.
- [24] D. Nyamjav and R. C. Holz, Direct patterning of silanized-biomolecules on semiconductor surfaces. *Langmuir*, 26(23), 18300, 2010. <https://doi.org/10.1021/la103297p>.
- [25] Z.-H. Wang and G. Jin, Covalent immobilization of proteins for the biosensor based on imaging ellipsometry. *Journal of Immunological Methods*, 285(2), 237, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jim.2003.12.002>.
- [26] M. Sypabekova, A. Hagemann, D. Rho and S. Kim, 3-Aminopropyltriethoxysilane (APTES) Deposition Methods on Oxide Surfaces in Solution and Vapor Phases for Biosensing Applications. *Biosensors*, 13, 36, 2023. <https://doi.org/10.3390/bios13010036>.
- [27] S. Laumier, T. Farrow, H. Zalinge, L. Seravalli, M. Bosi, and I. Sandall, Selection and functionalization of germanium nanowires for bio-sensing. *ACS Omega*, 7, 35288, 2022. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c04775>.
- [28] S.K. Vashist, E. Lam, S. Hrapovic, K. B. Male and H. T. Luong, Immobilization of Antibodies and enzymes on 3-aminopropyltriethoxysilane-functionalized bioanalytical platforms for biosensors and diagnostics. *Chemical Reviews*, 114(21), 11083, 2014. <https://doi.org/10.1021/cr5000943>.
- [29] J. Geltmeyer, G. Vancoillie, I. Steyaert, B. Breyne, G. Cousins, K. Lava, R. Hoogenboom, K. D. Buysser and K. D. Clerck, dye modification of nanofibrous silicon oxide membranes for colorimetric HCl and NH₃ sensing. *Advanced Functional Materials*, 26, 5987, 2016. <https://doi.org/10.1002/adfm.201602351>.
- [30] A. Lobnika, I. Oehmea, I. Murkovic, O. S. Wolfbeis, pH optical sensors based on sol-gels: Chemical doping versus covalent immobilization. *Analytica Chimica*

- Acta, 367, 159, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(97\)00708-3](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(97)00708-3).
- [31] G. J. Mohr, H. Müller, B. Bussemer, A. Stark, T. Carofiglio, S. Trupp, R. Heuermann, T. Henkel, D. Escudero, L. González, Design of acidochromic dyes for facile preparation of pH sensor layers. *Anal Bioanal Chem*, 392, 1411, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00216-008-2428-7>.
- [32] S. Trupp, M. Alberti, T. Carofiglio, E. Lubian, H. Lehmann, R. Heuermann, E. Yacoub-George, K. Bock, G. J. Mohr, Development of pH-sensitive indicator dyes for the preparation of micro-patterned optical sensor layers. *Sensors and Actuators B*, 150 206, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2010.07.015>.
- [33] D. Meroni, L. L. Presti, G. D. Liberto, M. Ceotto, R. G. Acres, K. C. Prince, R. Bellani, G. Soliveri and S. Ardizzone, A Close Look at the Structure of the TiO₂-APTES Interface in Hybrid Nanomaterials and Its Degradation Pathway: An Experimental and Theoretical Study. *Journal of Physical Chemistry C*, 121(1), 430, 2017. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b10720>.
- [34] H. Hafeez, D. K. Choi, C. M. Lee, P. J. Jesuraj, D. H. Kim, A. Song, K. B. Chung, M. Song, J. F. Ma, C.-S. Kim and S.Y. Ryu, Replacement of n-type layers with a non-toxic APTES interfacial layer to improve the performance of amorphous Si thin-film solar cells. *RSC Advances*, 9, 7536, 2019. <https://doi.org/10.1039/C8RA07409G>.
- [35] N. Aissaoui, L. Bergaoui, J. Landoulsi, J.-F. Lambert and S. Boujday, Silane Layers on Silicon Surfaces: Mechanism of Interaction, Stability and Influence on Protein Adsorption. *Langmuir*, 28, 656, 2012. <https://doi.org/10.1021/la2036778>.
- [36] P. Saengdee, W. Chaisriratanakul, W. Bunjongpru, W. Sripumkhai, A. Srisuwan, W. Jeamsaksiri, C. Hruanun, A. Poyai and C. Promptmas, Surface modification of silicon dioxide, silicon nitride and titanium oxynitride for lactate dehydrogenase immobilization. *Biosensors and Bioelectronics*, 67, 134, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bios.2014.07.057>.
- [37] N. Majoul, S. Aouida and B. Bessaïs, Progress of porous silicon APTES-functionalization by FTIR investigations. *Applied Surface Science*, 331, 388, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.01.107>.
- [38] M. Hiraoui, M. Guendouz, N. Lorrain, A. Moadhen, L. Haji and M. Oueslati, Spectroscopy studies of functionalized oxidized porous silicon surface for biosensing applications. *Materials Chemistry and Physics*, 128, 151, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2011.02.052>.
- [39] E. Makila, L.M. Bimbo, M. Kaasalainen, B. Herranz, A.J. Airaksinen, M. Heinonen, E. Kukku, J. Hirvonen, H.A. Santos and J. Salonen, Amine modification of thermally carbonized porous silicon with silane coupling chemistry. *Langmuir* 28, 14045, 2012. <https://doi.org/10.1021/la303091k>.
- [40] S.G. Coombs, S. Khodjanizyazova and F.V. Bright, Exploiting the 3-Aminopropyltriethoxysilane (APTES) autocatalytic nature to create bioconjugated microarrays on hydrogen-passivated porous silicon. *Talanta*, 177, 26, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2017.09.038>.
- [41] L. De Stefano, G. Oliviero, J. Amato, N. Borbone, G. Piccialli, L. Mayol, I. Rendina, M. Terracciano and I. Rea, Aminosilane functionalizations of mesoporous oxidized silicon for oligonucleotide synthesis and detection. *J R Soc Interface*, 10, 20130160, 2013. <http://dx.doi.org/10.1098/rsif.2013.0160>.
- [42] B. Qiao, T.J. Wang, H. Gao and Y. Jin, High density silanization of nano-silica particles using γ -aminopropyltriethoxysilane (APTES). *Applied Surface Science*, 351, 646, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.05.174>.
- [43] A. Miranda, L. Martínez and P. A. Beule, Facile synthesis of an aminopropylsilane layer on Si/SiO₂ substrates using ethanol as APTES solvent. *MethodsX*, 7, 100931, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.100931>.
- [44] E.J. Cueto-Diaz, A. Castro-Muniz, F. Suarez-Garcia, S. Galvez-Martinez, M.C. Torquemada-Vico, M.P. Valles-Gonzalez and E. Mateo-Marti, APTES-based silica nanoparticles as a potential modifier for the selective sequestration of CO₂ gas molecules. *Nanomaterials*, 11, 2893, 2021. <https://doi.org/10.3390/nano11112893>.
- [45] S. Ahoulou, E. Perret and J.-M. Nedelec, Functionalization and characterization of silicon nanowires for sensing applications: A review. *Nanomaterials*, 11, 999, 2021. <https://doi.org/10.3390/nano11040999>.
- [46] Y. Liang, J. Huang, P. Zang, J. Kim and W. Hu, Molecular layer deposition of APTES on silicon nanowire biosensors: Surface characterization, stability and pH response. *Applied Surface Science*, 322, 202, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.10.097>.
- [47] S. Mirsian, A. Khodadadian, M. Hedayati, A. Manzour-ol-Ajdad, R. Kalantarinejad and C. Heitzinger, A new method for selective functionalization of silicon nanowire sensors and Bayesian inversion for its parameters. *Biosensors and Bioelectronics*, 142, 111527, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2019.111527>.
- [48] S. Laumier, T. Farrow, H. Zalinge, L. Seravalli, M. Bosi and I. Sandall, Selection and functionalization of germanium nanowires for bio-sensing. *ACS Omega*, 7(39), 35288, 2022. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c04775>.
- [49] Q. Han, Y. Fu, L. Jin, J. Zhao, Z. Xu, F. Fang, J. Gao, W. Yu, Germanium nanopillar arrays showing near-100% absorption in the visible regime. *Nano Res.* 8, 2216, 2015. <https://doi.org/10.1007/s12274-015-0731-0K>.
- [50] Y. Kim, N. Lam, K. Kim, W. Park, J. Lee, Ge nanopillar solar cells epitaxially grown by metalorganic chemical vapor deposition. *Sci. Rep.* 7, 42693, 2017. <https://doi.org/10.1038/srep42693>.

- [51] S. An, Y. Liao, S. Shin, M. Kim, Black germanium photodetector exceeds external quantum efficiency of 160%. *Adv. Mater. Technol.* 7, 2100912, 2022. <https://doi.org/10.1002/admt.202100912>.
- [52] B. Son, S. Shin, Y. Jin, Y. Liao, Z. Zhao, J. Jeong, Q. J. Wang, X. Wang, C. S. Tan, M. Kim, A heavily doped germanium pyramid array for tunable optical antireflection in the broadband mid-infrared range. *J. Mater. Chem. C*, 10, 5797, 2022. <https://doi.org/10.1039/D2TC00141A>.
- [53] S. Acikgoz, H. Yungevis, E. Özünal, A. Sahin, Low-cost, fast and easy production of germanium nanostructures and interfacial electron transfer dynamics of BODIPY–germanium nanostructure system. *J. Mater. Sci.*, 52, 13149, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1434-6>.
- [54] S. Acikgoz, H. Yungevis, Precisely size-controlled fabrication of germanium pyramid array as an effective light-trapping material for photonic devices. *Appl. Phys. A* 127, 944, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00339-021-05108-1S>.
- [55] Açıkgoz ve H. Yungevis, GaAs yarı iletken yüzeyinde mikro yarıkların üretilmesi ve FLIM tekniği ile yüzey karakterizasyonu. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(3), 826, 2022. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1082122>.
- [56] V. Rozyyev, J.G. Murphy, E. Barry, A.U. Mane, S.J. Sibener, J.W. Elam, Vapor-phase grafting of a model aminosilane compound to Al₂O₃, ZnO, and TiO₂ surfaces prepared by atomic layer deposition. *Applied Surface Science*, 562, 149996, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.149996>.
- [57] I. Berktaş, A.N. Ghafar, P. Fontana, A. Caputcu, Y. Menciloglu and B.S. Okan, Facile Synthesis of Graphene from Waste Tire/Silica Hybrid Additives and Optimization Study for the Fabrication of Thermally Enhanced Cement Grouts. *Molecules*, 25, 886, 2020. <https://doi.org/10.3390/molecules25040886>.
- [58] L. Munguía-Cortés, I. Pérez-Hermosillo, R. Ojeda-López, J.M. Esparza-Schulz, C. Felipe-Mendoza, A. Cervantes-Urbe and A. Domínguez-Ortiz, APTES-Functionalization of SBA-15 Using Ethanol or Toluene: Textural Characterization and Sorption Performance of Carbon Dioxide. *J. Mex. Chem. Soc.*, 61(4), 273, 2017. <https://doi.org/10.29356/jmcs.v61i4.457>.
- [59] Z. Xu, Q. Liu and J.A. Finch, Silanation and stability of 3-aminopropyl triethoxy silane on nanosized superparamagnetic particles: I. Direct silanation. *Applied Surface Science*, 120, 269, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(97\)00234-1](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(97)00234-1).
- [60] M. Terracciano, I. Rea, J. Politi, L. De Stefano, Optical characterization of aminosilane-modified silicon dioxide surface for biosensing. *J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public.* 8, 13075, 2013. <http://dx.doi.org/10.2971/jeos.2013.13075>.
- [61] P. Saengdee, C. Promptmas, S. Thanapitak, A. Srisuwan, A. Pankiew, N. Thornyanadacha, W. Chaisriratanakul, E. Chaowicharat, W. Jeamsaksiri, Optimization of 3-aminopropyltriethoxysilane functionalization on silicon nitride surface for biomolecule immobilization. *Talanta* 207, 120305, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.120305>.
- [62] I. J. Bruce and T. Sen, Surface modification of magnetic nanoparticles with alkoxysilanes and their application in magnetic bioseparations. *Langmuir*, 21, 7029, 2005. <https://doi.org/10.1021/la050553t>.
- [63] J. A. Howarter and J.P. Youngblood, Optimization of silica silanization by 3-aminopropyltriethoxysilane. *Langmuir*, 22, 11142, 2006. <https://doi.org/10.1021/la061240g>.
- [64] Y. Q. Gao and R. A. Marcus, On the theory of electron transfer reactions at semiconductor/liquid interfaces. II. A free electron model. *J. Chem. Phys.*, 113, 6351, 2000. <https://doi.org/10.1063/1.1309528>.
- [65] S. L. Shinde, T. D. Dao, S. Ishii, L. Nien, K. K. Nanda, T. Nagao, White light emission from black germanium. *ACS Photonics*, 4(7), 1722, 2017. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.7b00214>.





Evaluating the impact of sonication process on graphene oxide structural properties

Sonikasyon işleminin grafen oksit yapısal özellikleri üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi

Fatih Sargin¹ , Funda Ak Azem^{2,*} , Kursat Kanbur³ , Isil Birlik⁴ , Ahmet Turk⁵ 

^{1,3} Dokuz Eylül University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 35160, İzmir, Türkiye

^{1,3,5} Manisa Celal Bayar University, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 45140, Manisa, Türkiye

^{2,4} Dokuz Eylül University, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 35160, İzmir, Türkiye

^{2,4} Dokuz Eylül University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Nanoscience and Nanoengineering, 35160, İzmir, Türkiye

Abstract

Graphene oxide (GO) is one of the members of carbon-based nanomaterials and can be featured as a graphene structure decorated with various oxygenated functional groups. Hummers method is one of the most known and versatile methods for the production of GO nanomaterials because of its ease of application, parameter controllability, and high yield. This process enables graphite oxidation and exfoliation into single or multi-layered GO sheets. Exfoliation separates multilayered graphite oxide flakes or particles; it forms single layer GO by forcing oxidizing agents or solvent molecules between layers. The sonication process can exfoliate the oxidized layers, resulting in the formation of GO structure when the exfoliated layers consist of only one or a few layers of carbon atoms. This process is considered among the key parameters of the Hummers method that influence the characteristics of GO-based nanomaterials. In this study, the impact of sonication process parameters, duration time, and power on morphological and structural characteristics of GO development was examined. For this purpose, characterization studies were performed by using a Scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction (XRD), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), UV-Vis spectroscopy, and Raman spectroscopy analysis. It has been determined that the increase in applied sonication power and duration causes the distance between layers to decrease and defects to increase in the resulting GO structure. The findings revealed that the sample treated with the lowest power and shortest sonication time had the highest interlayer distance value of 7.83Å and the lowest C/O ratio of 1.62. Consequently, it exhibited the highest oxidation level compared to the other samples.

Keywords: Graphene oxide, Exfoliation, Sonication

Öz

Karbon bazlı nanomalzemelerin üyelerinden biri olan grafen oksit (GO), basitçe çeşitli oksijen içerikli fonksiyonel gruplarca dekore edilmiş grafen yapısı olarak da tanımlanabilmektedir. Hummers yöntemi, uygulama kolaylığı, parametre kontrol edilebilirliği ve yüksek verimi nedeniyle GO nanomalzemelerinin üretimi için en sık kullanılan, çok yönlü yöntemlerden biridir. Bu yöntem, başlangıç malzemesi olan grafitin oksidasyonunu ve tek veya birkaç katmanlı GO tabakaları şeklinde katmanlara ayrılmasına imkân vermektedir. Eksfoliasyon, çok katmanlı grafit oksit tabakalarının veya parçacıklarının birbirinden ayrılması, oksitleyici ajanların veya solvent moleküllerinin bu katmanlar arasına girmesi sürecidir. Sonikasyon işlemi ise oksitlenmiş katmanları birbirinden ayırarak yalnızca bir veya birkaç karbon atomundan meydana gelen tek katmanlı GO yapısının oluşmasını sağlamaktadır. Bu proses GO bazlı nanomalzemelerin özelliklerini etkileyen Hummers yönteminin temel parametreleri arasında yer almaktadır. Bu çalışmada sonikasyon işlem süresi ve güç parametrelerinin GO nanomalzemelerin morfolojik ve yapısal özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını kırınımı (XRD), Fourier-transform kızılötesi spektroskopisi (FTIR), UV-Vis spektroskopisi ve Raman spektroskopisi analizi kullanılarak karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Uygulanan sonikasyon gücü ve süresindeki artışın katmanlar arası mesafenin azalmasına ve elde edilen GO yapısında kusurların artmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Bulgular, en düşük güç ve en kısa sonikasyon süresine tabii tutulan numunenin, 7,83Å ile en yüksek katmanlar arası mesafe değerine ve 1,62 ile en düşük C/O oranına sahip olduğunu ortaya çıkardı. Sonuç olarak, diğer numunelerle kıyasla en yüksek oksidasyon seviyesini sergilemiştir.

Anahtar kelimeler: Grafen oksit, Eksfoliasyon, Sonikasyon

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: funda.ak@deu.edu.tr (F. Ak Azem)

Geliş / Received: 22.04.2024 Kabul / Accepted: 16.07.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1470478

1 Introduction

Graphene is a single-layer structure that consists of carbon atoms in the form of a honeycomb. In this structure, carbon atoms form sp^2 bonds, which results in excellent mechanical, electrical, and thermal properties [1]. Despite its outstanding qualities, the main drawbacks of graphene are its limited production capacity and applicability due to its nature. GO is another member of the carbon nanomaterial family in a single-layer form. GO has been classified as one of the most prevalent highly oxidized graphene derivatives based on its microstructural properties. It has numerous oxygen functional groups and a large surface area, which makes it highly reactive [2]. GO, a derivative of graphene is a versatile material that offers a wide range of advantages and shows excellent shielding performance, high aspect ratio, ultrahigh strength, ultrahigh thermal conductivity, high surface activity, and other properties of graphene. Moreover, it features a carboxyl group, hydroxyl group, epoxy group, and other functional groups that can be used to prepare a variety of derivatives [3,4]. These functional groups make GO soluble because of the high affinity of these groups for water molecules [5,6]. Even though GO's superior properties, such as easy production, good solubility, a wide range of application areas, and ease of surface modification, are enough for its reputation, it is also known for its reduction properties, which result in the formation of reduced graphene oxide (rGO), a material that similar to graphene [7]. GO has a wide range of application areas such as electronic devices, sensors, optical materials, photovoltaic devices, energy storage devices, photocatalytic applications, batteries, supercapacitors, water and air filters, bioimaging, biosensors, drug delivery systems and scaffolds [8]. Top-down techniques are the primary methods for producing graphene from graphite. These approaches consist of solvent exfoliation or oxidation/exfoliation/reduction. Brodie, Staudenmaier, and Hummers used conventional chemical oxidation operations to prepare GO. These processes utilize graphite as the raw material for an oxidation reaction using various strong oxidants peeled off to produce GO [4,9–13].

Hummers Method is considered one of the most efficient and fast routes compared to other methods [7]. This method was initially proposed by Hummer and Offman in 1958, and the researchers have made various modifications and improvements throughout time [1,7,14–16]. The preparation approach for Hummers GO can be considered a two-step process. First, graphite is oxidized by a mixture of oxidizing and intercalating chemicals. Then, it is exfoliated in water to produce single-layered GO sheets. This process results in the production of single-layered GO sheets [17]. In the first stage, graphite combines with an acidic solution and transforms into an intercalation compound. In the second step of ongoing transformation, intercalated graphite reacts with strong oxidizing agents and forms pristine graphite oxide (PGO). Because of diffusion, PGO consists of graphitic layers with oxidizing agents between each layer. At the final stage, water enters the structure, and PGO transforms into GO by exfoliating graphitic layers [17,18].

Nowadays, researchers are aiming to produce GO faster, safer, cheaper, and more efficiently. For this purpose, the exfoliation of graphitic layers gains much importance. Since Van der Waals bonds hold graphitic layers together, a complete exfoliation is required to separate these layers and produce single-layered structures [19]. Exfoliation is simply the result of the destruction of Van der Waals bonds between graphitic layers [20]. Therefore, a weak affinity between graphitic layers is required for improved exfoliation. As graphite oxidation occurs due to the reaction between solution and graphite layers, functional groups form between graphite layers and increase the inter-layer spacing, contributing to the exfoliation [21].

Exfoliation of GO layers can be achieved by several approaches, such as chemical exfoliation [22], electrochemical exfoliation [23], thermal treatment, and liquid phase exfoliation [19]. In the liquid phase exfoliation, exfoliation can be obtained by sonication or mixing. It was noted that the characteristics of the obtained powder can be changed according to exfoliation parameters such as type of solvent, centrifugation process sonication type, and apparatus [23, 24]. In this context, the sonication process is one of the favored approaches for improving the oxidation degree and exfoliation of the final product. In the sonication process, mechanical vibrations caused by high-frequency ultrasound waves cause cavitation and create mechanical pressure waves. Depending on the parameters of the sonication process, the local high temperature produced by the cavitation phenomenon causes faster oxidation of the graphite [25]. To the best of our knowledge, studies in the literature have generally focused on optimizing sonication time using bath sonication [26–28]. The exfoliation process is relatively more effective because sonication with probe sonication significantly affects van der Waals forces in graphite materials. Based on this point, the relationship between ultrasound power and time in the sonication process performed with the probe was investigated in the study. Sabbaghan et al. showed that ultrasonic waves can produce enough energy to break down the Van der Waals bonds in the graphitic structure, which leads to the exfoliation of graphite oxide structures [29]. Botas et al. subjected GO solutions to ultrasound waves from 0.5 h to 24 h [30]. Their results showed that exfoliation yield was increased, and the lateral size of GO sheets was decreased with the increasing sonication time. Similarly, Kumar et al. investigated the effect of sonication in an ultrasonic bath with a power output of 100 W for periods between 5 and 60 min. The authors proved that with increasing sonication time, the interlayer distance of GO sheets and the O/C ratio of GO products increased [31]. In a different approach, Yang et al. used a tabletop ultrasonication cleaner to exfoliate graphite oxide to GO and produced highly oxidized GO films [32].

Herein, we propose a systematic approach to observing the effect of sonication time and power on GO production. In this context, GO solutions were sonicated by a sonication probe with varying time and power parameters. SEM (Energy-dispersive X-ray spectroscopy), EDX, XRD, FTIR, Raman, and UV-Vis analysis were performed to evaluate the

structural properties and oxidation degree of resultant GO products.

2 Material and methods

2.1 Materials

Graphite powder (with a powder size of 20 μm), sulphuric acid (H_2SO_4 , 95%-98% purity), phosphoric acid (H_3PO_4 , 85%), potassium permanganate (KMnO_4 , 99%), hydrogen peroxide (H_2O_2 , 30%), hydrochloric acid (HCl , 37%) were purchased from Sigma Aldrich (St. Louis, MO).

2.2 GO production

GO samples have been developed using the Modified Hummers technique. Graphite powder was added to $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_3\text{PO}_4$ (v/v%) solution and stirred in an ice bath for one h. Then, KMnO_4 was added to the mixture. Afterward, 100 mL of deionized water was gradually added to the mixture. Mechanical stirring was kept for 1 hour after the water addition was completed. Finally, the solution was boosted with deionized water and H_2O_2 . After adding H_2O_2 to the solution, the color of the solution changed from black to dark brown. The resultant solution was centrifuged to remove excess water, and GO slurry was obtained. To remove retained ions and other residues, GO slurry was washed with HCl solution and deionized water several times until a neutral pH was obtained. Following the washing step, the resultant GO solution was exfoliated using sonication. A schematic flow chart of GO production is demonstrated in Figure 1. The effect of exfoliation was controlled by the sonication process, which involved varying time and power outputs. The sonication process was done by Bandelin Sonopulse HD2200, an ultrasonic homogenizer. Table 1 displays the abbreviations for the produced GO samples under various sonication conditions. After the sonication process, the GO solutions were dried overnight in atmospheric conditions. Figure 2 shows the obtained GO sample after the drying process.

Table 1. Abbreviations of the produced GO samples

Samples	Sonication Time (min)	Sonication Power (Watt)
S1	10	30
S2	20	30
S3	10	50
S4	20	50

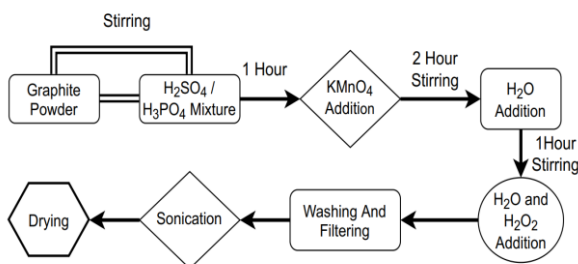


Figure 1. Schematic flow chart of GO production

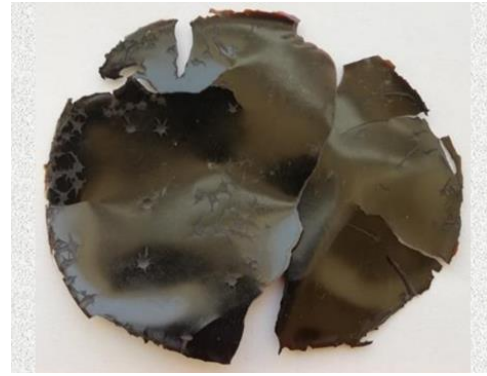


Figure 2. S1 sample was obtained after the drying step

2.3 Materials characterization

X-ray diffraction (XRD) analysis was performed using a Rigaku DMax-2100/PC X-ray diffractometer with $\text{Cu-K}\alpha$ radiation to evaluate the phase structure and oxidation degree of each synthesized GO sample as well as graphite powder for comparison. SEM equipped with EDX was used to investigate the morphology and evaluate the chemical composition of each GO sample (Zeiss Gemini SEM 500). FTIR spectroscopy of samples was performed with a Thermo Scientific FTIR Spectrometer with an ATR module in the range of 500-4000 cm^{-1} wavenumbers to determine the functional groups in GO structure. Furthermore, UV-visible spectra of samples were taken with a Thermo Scientific Evolution 260 BIO UV spectrometer for 200-600 nm wavelength. A Renishaw Raman Spectrometer with a 532 nm laser source was used to investigate Raman spectroscopy investigation in the 230-3200 cm^{-1} wavenumber region.

3 Results and discussions

X-ray diffraction patterns of graphite powder and produced GO samples are given in Figure 3. XRD pattern of graphite consisted of a main peak with a high intensity at 2θ of about 26° , which corresponded to the (002) plane (JCPDS No: 41-1487) [33]. Additionally, the XRD pattern of GO samples exhibits a characteristic main peak at approximately 11° (2θ) corresponding to the (001) plane as identified by JCPDS card No: 00-065-1528 [34]. It was reported that GO nanomaterials exhibit a main peak between $9\text{-}12^\circ$ depending on their production method and oxidation degree. The peak location (001) enables a comparison of the interlayer distance in all examined samples [35, 36]. The difference in XRD patterns between graphite and produced GO can be seen clearly, as the main peak of samples shifted to smaller 2θ angles. The 2θ shifts occurring in GO structures can be interpreted depending on the production mechanism. During GO production, an acid mixture first penetrates between graphite layers. Then, the oxidizing agent diffuses to graphite interlayers, which eventually results in the oxidation of graphite and the formation of various functional groups [18]. As oxidation occurs, more functional groups are introduced between layers, which expands interlayer distance [37]. Using Bragg's law, interlayer distances between derived GO samples were calculated from XRD data. Table 2 shows the interlayer spacing (d_{002}) and crystallite size values for all samples calculated using

Bragg's law and the Scherrer equation, respectively [36]. As can be seen, graphite had a lower interlayer distance value than GO samples since it had high crystallinity and a well-ordered structure. Furthermore, oxidation during the modified Hummers method resulted in greater interlayer distance values for GO samples. The S1 sample with a main peak of 11.34° (2θ) had the highest interlayer distance value of 7.83\AA , which indicated its high oxidation degree. Moreover, the S4 sample had the lowest interlayer distance value of 7.52\AA . In this context, an increase in the interlayer distance of GO nanomaterials means an increase in the oxidation degree. Chen et al. demonstrated that mechanical exfoliation of GO sheets can be achieved through sonication [4]. The interplanar distance can be used to interpret the degree of oxidation or the number of functional groups attached to the basal plane of GO, which increases with higher oxidation levels [38]. Thus, this result could be attributed to obtained GO nanomaterials with the highest interlayer distance value, which tend to be better oxidized and well exfoliated. Additionally, results indicated that the (002) peak shifts toward a lower 2θ value, which suggests an increase in the interlayer d-spacing. With the increasing number of oxygen-related functional groups bonded to the carbon basal plane with Van der Waals, interlayer distance and oxidation degree could be increased. However, the fragile nature of Van der Waals bonding also bears the possibility of removal of such functional groups [16]. Furthermore, the intensity of the (001) peak in the X-ray diffraction pattern of GO is employed to assess the oxidation degree [38]. Sample S1 shows a more intense (001) peak, suggesting higher oxidation levels than other samples. It has been observed that as the ultrasonic power increases, the degradation effect of ultrasonics increases, resulting in the loss of functional groups and decreasing interlayer spacing. Although the exfoliation process generally increases interlayer distance and takes place during sonication, it was reported that excessive usage of sonication may destroy GO layers and reduce functional groups [5, 30]. Mellado et al. applied different sonication times to GO samples and found that the XRD peak position and oxidation degree of sonicated samples altered with the applied procedure. The authors additionally reported that GO sheets were fragmented and experienced structural damage due to intense sonication [5]. On the other hand, Sabbaghan et al. proved that it was possible to remove the functional groups of GO structure and produce reduced GO nanomaterials with the help of an appropriate sonication procedure. Consequently, the interlayer distance decreases with increasing sonication time and power due to excessive sonication [29]. Also, secondary peaks around 21.23° and 26° in S2 and S3 samples might indicate the removal of functional groups and the reduction of GO samples in small quantities [39-41]. Furthermore, crystallite size calculations showed that crystallite size remarkably decreased with the oxidation of graphite. The S4 sample, which has a crystallite size value of 2.32 nm , is shown to have the lowest value of all the synthesized GO samples (Table 2). It was understood that the sonication process led to breaking GO sheets into smaller fragments. The reason behind the GO sheets separating into

small fragments was identified as the sonication method [5]. Kumar et al. interpreted that the reduction in crystallite size is associated with the reduction in GO domains due to oxidation-induced structural disorder in the form of sp^3 hybridized carbon atoms [42].

Therefore, as the sonication power output increases, the samples experience excessive GO layer exfoliation, reducing the crystallite size and the interlayer spacing. On the other hand, the intensity of the (001) peak in sample S3 decreased, indicating a lower oxidation level than other samples. According to the literature, some studies showed that, in some cases, decreasing oxidation degree and exfoliation rate affects crystallite size inversely [43, 44]. The result obtained regarding the crystallite size determined for sample S3 is compatible with the literature. In this context, the increase in crystallite size in sample S3, which has a lower oxidation level, is interpreted as the presence of relatively more damaged functional group bonds rather than C=C bonds [45].

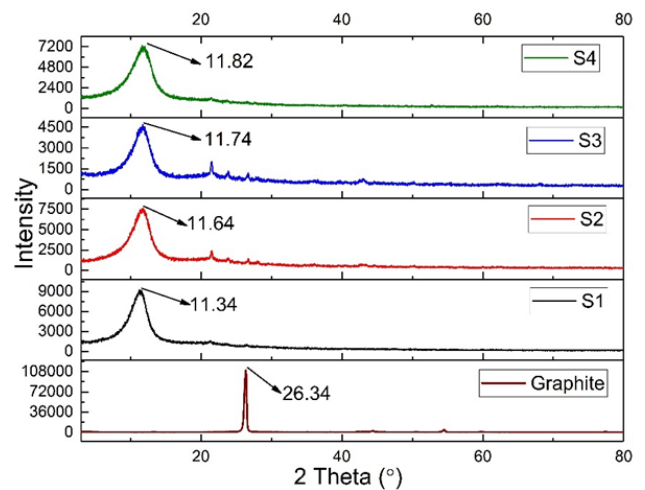


Figure 3. XRD spectra of graphite and GO samples

Table 2. Interlayer spacing (d_{002}) and crystallite size values of graphite and GO samples

Sample	Graphite	S1	S2	S3	S4
Interlayer spacing (\AA)	3.47	7.83	7.63	7.57	7.52
Crystallite size (nm)	22.26	2.7	2.67	2.85	2.32

FTIR spectroscopy was performed to identify the functional groups present in the GO samples. The GO structure has a variety of oxygen functional groups, such as carbonyl (C=O), carboxyl (-COOH), hydroxyl (-OH), and epoxy (C-O-C) [36, 43]. The FTIR spectra of GO samples produced with different sonication parameters are given in Figure 4. Also, the FTIR spectrum of graphite powder is provided in the same figure for a better evaluation of functional group formation. The broad peak around $3200\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$ was attributed to O-H vibrations of adsorbed water trapped in the GO structure [37].

Another characteristic GO peak around 1720 cm^{-1} was attributed to carboxyl vibrations. The presence of the absorption peak at 1610 cm^{-1} can be assigned to sp^2

hybridized C=C bonds [36, 44]. In addition, absorption peaks around 1228, 1048, and 972 cm^{-1} indicate the presence of epoxy, alkoxy C-O stretching, and C-O bending vibrations, respectively [43, 45]. According to Figure 4, all the samples have characteristic GO functional groups in their structure. The presence of functional groups that contain oxygen confirms that the graphite has successfully oxidized into GO [46].

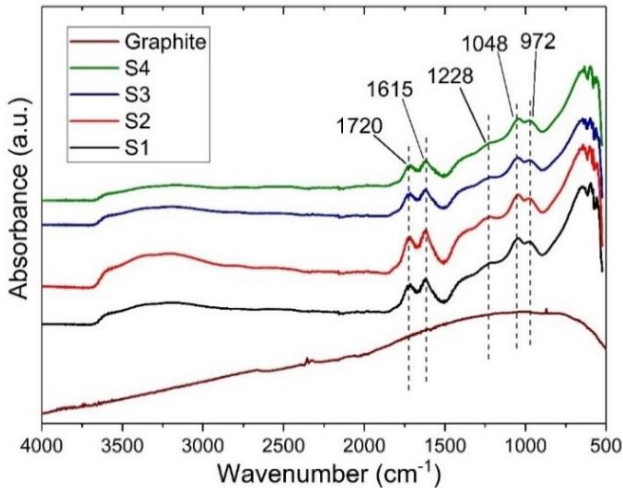


Figure 4. FTIR spectra of graphite and synthesized GO samples

On the other hand, the low absorption degree of peaks around 3200 cm^{-1} indicates that S3 and S4 samples had relatively less O-H bonds in their structure [14]. Therefore, S1 and S2 samples might have slightly more functional groups in their structure compared to S3 and S4 [35]. It is seen that the intensity of the peaks for the oxygen-containing functional groups decreases with higher sonication time and power. Yoo and Park produced GO nanomaterials with different oxidation degrees. Their FTIR analysis proved that with the decrease in oxidation degrees, some functional groups vanished or diminished from the spectra [35]. It is seen that the intensity of the functional groups decreases in GO structures obtained through different sonication parameters [47].

Figure 5 depicts the UV-Vis absorption spectra of GO samples with different sonication parameters. According to the literature, characteristic UV-Vis spectra of GO nanomaterials show a strong absorption peak at 230 nm, which corresponds π - π^* transitions of C=C bonding, and a slight shoulder around 300 nm, which corresponds to n- π^* transitions C=O bonds [36, 37]. It was seen that all samples had similar carbon rings in their basal plane, and the change of sonication parameters had not caused a significant change in sp² conjugated carbon formation [14]. Adjusting the amount of oxygen-containing functional groups can significantly alter the optical properties of GO. Figure 4 showed that all samples proved to have GO characteristic π - π^* and n- π^* transitions, which agreed with FTIR results in the literature [35].

Studies showed that GO nanomaterials show p-type semiconductor behavior thanks to their oxygen-containing

functional groups [48]. The band gap energy of GO nanomaterials was calculated from optical absorption spectra using Tauc's relation as given in Equation (1) [49]. The band gap energy can be derived from the intersection of a line, which is drawn from the linear region of the curve and obtained by Tauc's relation [50].

$$(ah\nu)^{1/\gamma} = A(h\nu - E_g) \quad (1)$$

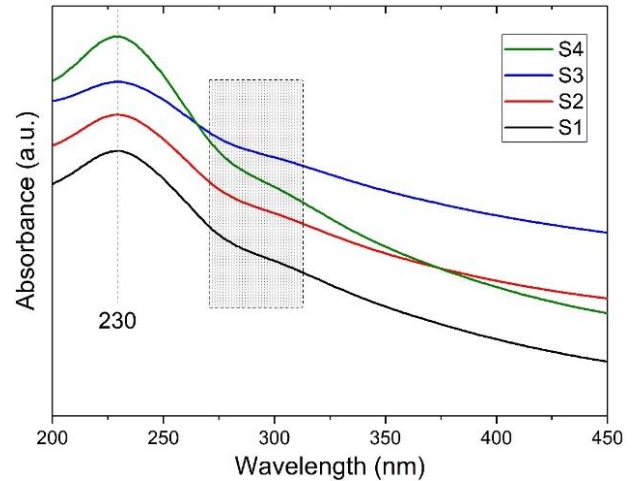


Figure 5. UV-Vis absorption spectra of GO samples

Our measurements obtained band gap values of 4.14, 4.21, 4.07, and 4.15 eV for S1, S2, S3, and S4 samples, respectively (Figure 6). According to the literature, the band gap value of GO nanoparticles can range from 2.5 to 6.5 eV [48,49]. The band gap energy of GO nanomaterials is considerably related to the number of sp² and sp³ hybridized regions in the basal plane and holes and carbon vacancies [49,51]. Sharma et al. evaluated the optical and electrical properties of GO and rGO samples by Tauc plots. They found that rGO samples had lower band gap values than fully oxidized GO samples [52]. Also, studies revealed that an increase in the degree of reduction of GO samples gave rise to a decrease in the band gap values of rGO samples [49,53]. Although several studies showed that GO nanomaterials with higher oxidation degrees tend to have higher band gap values, detailed analysis showed that oxidation degree alone could not explain the increase or decrease in the band gap value obtained from Tauc's plots [51,54]. However, de Lima et al. proved that GO samples with comparable oxidation levels could have various band gap values. It has been interpreted that this difference is due to several reasons, such as the distribution of defects on the basal plane, distribution of sp² hybridized carbon regions, relative area of each sp² hybridized carbon region, amount and type of defects (holes, carbon vacancies, etc.) in the basal plane [51]. In other respects, a few studies pointed out that increasing crystallite size may decrease band gap value [55, 56]. Thus, as mentioned above, relatively higher destruction of functional group bonds rather than C=C bonds in the S3 sample may generate a low band gap value.

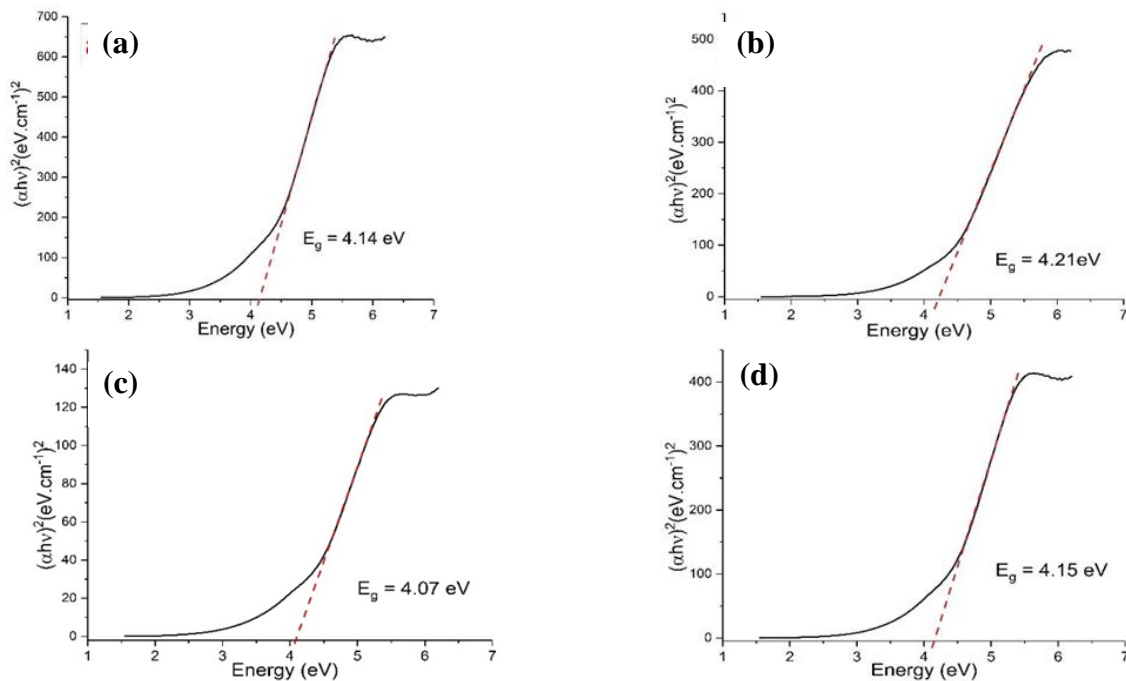


Figure 6. The optical band gap energy of GO samples (a) S1, (b) S2, (c) S3, and (d) S4

In this context, in our study, it was seen that different sonication parameters not only altered the interlayer distance and oxidation degree but also introduced defects that could change the band gap energy of each sample.

The structural characteristics of graphene oxide can be revealed by Raman spectroscopy. Figure 7 depicts Raman spectra of synthesized GO samples. Raman spectra of GO nanomaterials generally consist of two strong peaks. The G band results from the bond stretching of carbon sp² atoms, whereas the D band is ascribed to structural instability [57]. The peak around 1355 cm⁻¹, which is known as the D band

shows defects in the carbon basal plane, such as vacancies and disorders caused by functional groups attached to carbon atoms [53,58]. The D band also shows the existence of sp³ hybridized carbon atoms accordingly [42]. On the other hand, the peak around 1590 cm⁻¹, known as the G band, originates from E_{2g} phonon modes of graphitic structure and shows the presence of sp² hybridized carbon atoms [42,48]. Figure 7 shows the Raman spectrum of S1, S2, S3, and S4 samples. All samples showed D and G bands around 1355 and 1590 cm⁻¹, characteristic of GO nanomaterials [59]. Studies revealed that comparing the D and G bands might be used to assess the degree of oxidation as well as the ratio of defects [42,60]. The ID/IG ratio of every sample was determined using Raman spectra. The comparable values of the S1, S2, and S3 samples were determined to be around 0.84; however, the ratio of the S4 sample was found to be 0.95. Although an increased oxidation rate is expected to increase the ID/IG ratio, it can also increase defects and functional groups. In some scenarios, Eigler and Hirsch proved that the ID/IG ratio was not constantly associated with the oxidation degree and defect ratio [61]. Therefore, Sieradzka et al. produced GO

nanomaterials with various oxidation degrees and applied a reduction process to these samples. Their results showed that the ID/IG ratio of GO samples changed regardless of the oxidation degree of the samples [62]. Also, it was found that an increase in the ID/IG ratio was seen in all samples after the reduction process. Similarly, Krishnamoorthy et al. produced GO nanomaterials with different oxidation degrees. They revealed that the ID/IG ratio increased with the increasing oxidation degree up to a certain point, then decreased [63]. Other studies also reported related findings about the effect of oxidation degree and defect ratio on the ID/IG ratio of GO nanomaterials [58,64]. Information regarding the structural disorder is provided by the intensity ratio (ID/IG) of these bands; a higher ID/IG value indicates a more severe structural disorder [65]. Based on this point, even if the XRD analysis shows that the S1 sample has the highest oxidation degree, it can be interpreted that the S1 sample has fewer defects than the S4 sample. Moreover, this determination revealed that the relatively strong sonication process could lead to more structural defects than oxidative defects, especially for the S4 sample.

SEM images and EDX results of GO samples produced with varying sonication parameters are given in Figure 8. As can be seen in Figure 8, all samples showed similar morphological formations with a homogenous wrinkled surface. Produced GO samples were exfoliated and fragmented during the sonication process [5]. Because of their functional groups, GO sheets provide a homogenous colloidal solution as they were in solution. As the water evaporates throughout the drying process, the GO sheets begin to collapse on each other and over one another. After drying, the GO sheets form a layered structure resembling a film [40].

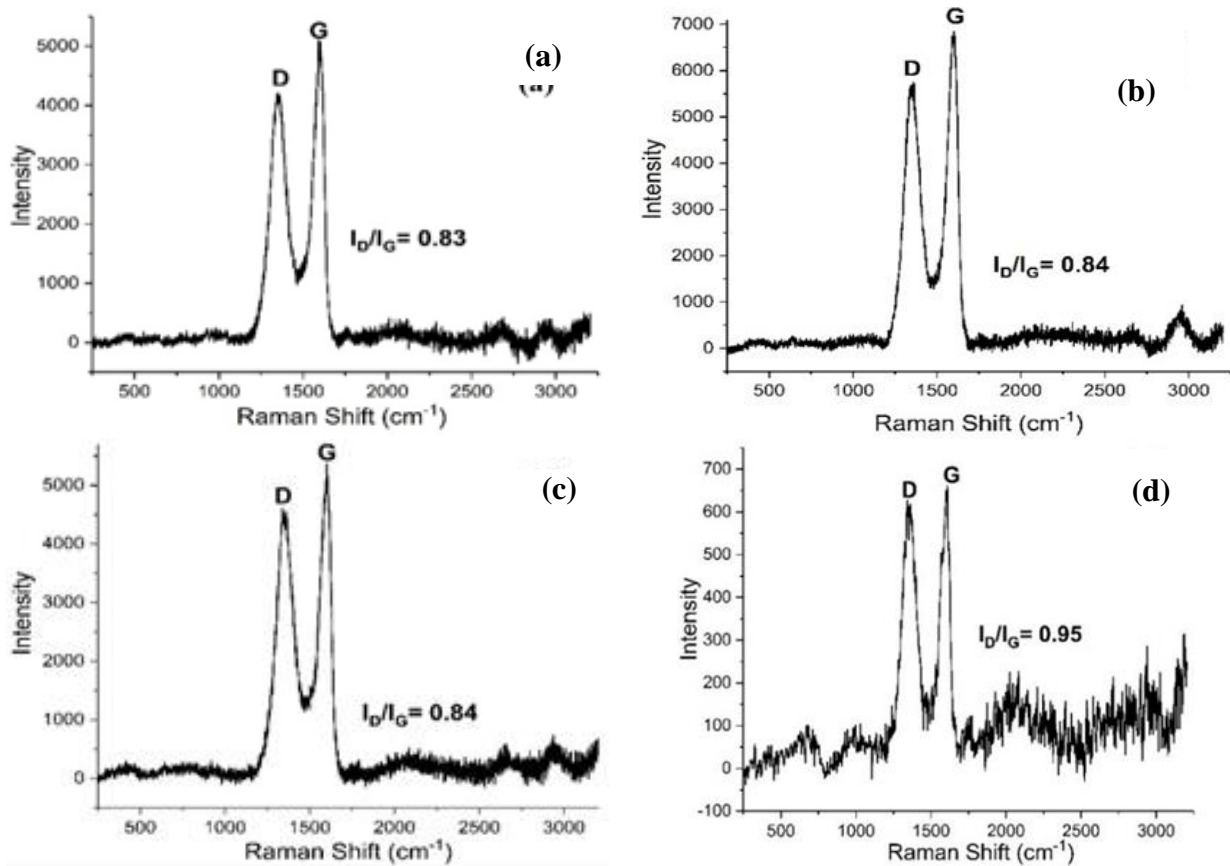


Figure 7. Raman spectra of synthesized GO samples (a) S1, (b) S2, (c) S3, and (d) S4

As mentioned in the XRD analysis, power output during the sonication led to the loss of functional groups and a decrease in interlayer distance. The observed result suggests that our sonication method was more than enough for exfoliation. Therefore, obtaining GO films after the drying procedure was quite reasonable because of our production method. Furthermore, the EDX technique was used to conduct a semi-quantitative assessment of elemental C in derivatized GO samples. EDX results in Figure 7 revealed that the samples contained no substances other than C and O, which are the main components of GO since its structure is mainly composed of C atoms arranged in a honeycomb formation and oxygenated functional groups attached to them [7].

As the EDX analysis proved that there were no contaminations or residues in the structure, it also helps to evaluate the oxidation degree of samples. The C/O ratios for samples S1, S2, S3, and S4 were calculated using the EDX data and were found to be 1.62, 1.64, 2.05, and 2.09, respectively. It can be seen that sample S1 has the lowest C/O ratio (1.69), while sample S4 has the highest ratio with a value of 2.09. Studies in the literature point out the oxidation degree of GO samples improves while the C/O ratio decreases [66,67]. EDX results demonstrate that sample S1 has a higher degree of oxidation than other samples.

The results of the characterization studies have proven that the applied sonication parameters affect the oxidation of GO samples. Although all samples had similar

morphological properties and functional groups, they had different C/O ratios and interlayer spacing values. As a function of the sonication time and power throughout the sonication process, the increase in the interlayer space identified is interpreted as an increased exfoliation of the flakes, depending on the XRD patterns.

Since ultrasonic probes produce sonication regions under the contact area of the probe, ultrasonic effects produced by these devices tend to be more intense and powerful [68]. There are several drawbacks of the excessive sonication process on GO solutions reported in the literature, such as loss of functional groups, damage to sheet formation, and more wrinkled surfaces [5,26,62]. Additionally, because of the high energy output caused by the sonication probe, even C-C/C=C bonds could break, which could bring about either the formation of new oxygen groups or the folding of graphene sheets [69]. Consequently, increasing time and sonication power in our study led to highly exfoliated and less oxidized GO samples. On the other hand, it was understood that excessive sonication not only exfoliated the GO sheets but also damaged Van der Waals bonds, eventually leading to loss of oxygen related functional groups and causing an increase in C/O ratio consistent with the previous studies [5,68]. As a result, the S1 sample that was sonicated with 10 minutes and 30 W power exhibited the highest degree of oxidation, homogeneous phase development, and exfoliated structure.

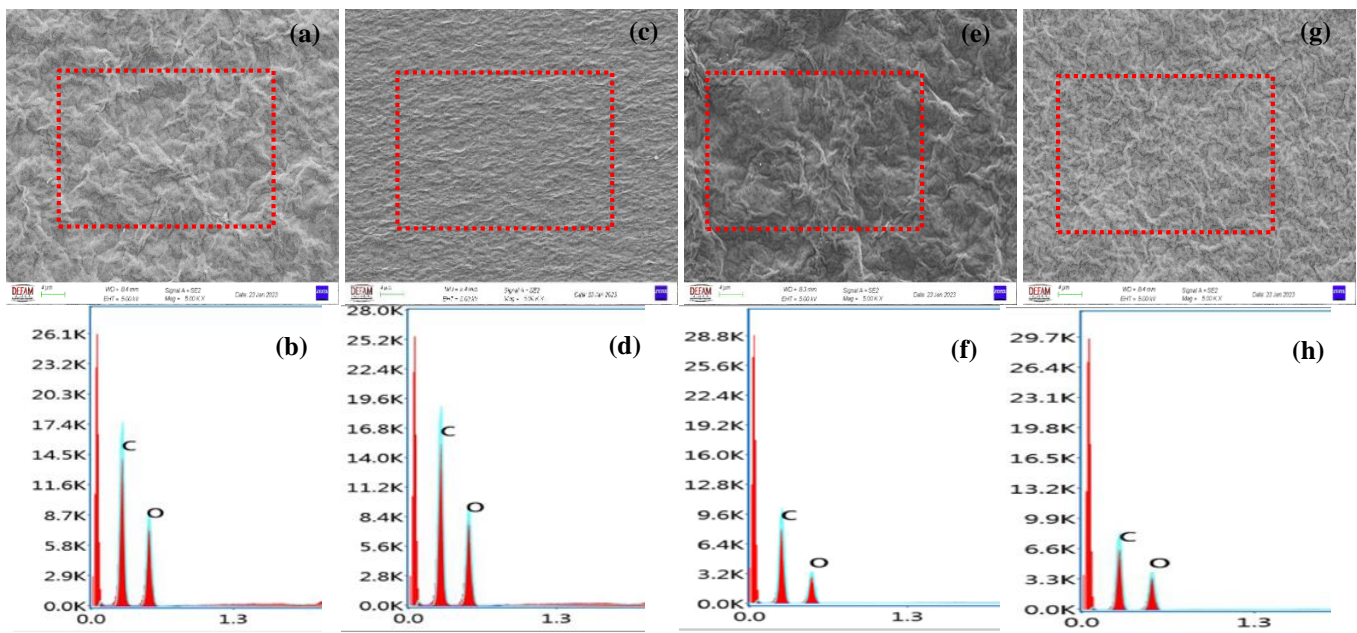


Figure 8. SEM images and EDX analyses results of GO samples (a-b) S1, (c-d) S2, (e-f) S3, and (g-h) S4

4 Conclusions

In the present study, we demonstrated the effect of the sonication process parameters on the structural properties of GO nanomaterials synthesized by the Improved Hummers method. XRD analysis results indicated the formation of GO structure and showed that increasing sonication time and power led to excessive exfoliation, decreased interlayer distance between GO sheets, and crystallite size. While FTIR analysis showed that all samples proved to have characteristic functional groups in GO structure, UV-Vis analysis showed no significant distinction among samples. Additionally, band gap calculations from optical absorption spectra revealed the highest value obtained from the S2 sample with 4.21 eV. On the other hand, Raman analysis showed that an increase in sonication power and time induced an increase in the defect ratio of GO samples. SEM results showed that with the effect of the sonication process, exfoliation and fragmentation of GO sheets occurred in all of the samples, which effectuate similar morphological properties after the drying process.

Consequently, it was demonstrated that the degree of oxidation was decreased by increasing the sonication time and power parameters investigated in the present study. Sonication power and time increased the defect ratio of GO samples. SEM results showed that with the effect of the sonication process, exfoliation and fragmentation of GO sheets occurred in all of the samples, which effectuate similar morphological properties after the drying process. Our research findings show that increasing both sonication power and time leads to decreased oxidation levels. Consequently, the S1 sample was found to have the highest oxidation level and the lowest defect rate compared to the other samples.

Acknowledgment

The authors are grateful to thank Dokuz Eylul University (DEU) Department of Metallurgical and Materials Engineering and Center for Fabrication and Application of Electronic Materials for their invaluable assistance. The authors would also like to acknowledge the Manisa Celal Bayar University Scientific Research Projects Coordination Unit (Project number: 2020-038) for their financial support of this study.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): % 14

References

- [1] M. Sohail, M. Saleem, S. Ullah, N. Saeed, A. Afridi, M. Khan, and M. Arif, Modified and improved Hummer's synthesis of graphene oxide for capacitors applications. *Modern Electronic Materials*, 3, 110–116, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.moem.2017.07.002>.
- [2] A. Anwar, T.P. Chang, and C.T. Chen, Graphene oxide synthesis using a top-down approach and discrete characterization techniques: a holistic review. *Carbon Letters*, 32, 1–38, 2022. <https://doi.org/10.1007/S42823-021-00272-Z>.
- [3] M.F.R. Hanifah, J. Jaafar, M.H.D. Othman, A.F. Ismail, M.A. Rahman, N. Yusof, W.N.W. Salleh, and F. Aziz, Facile synthesis of highly favorable graphene oxide: Effect of oxidation degree on the structural, morphological, thermal and electrochemical properties. *Materialia*, 6, 100344, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2019.100344>.
- [4] X. Chen, Z. Qu, Z. Liu, and G. Ren, Mechanism of Oxidation of Graphite to Graphene Oxide by the

- Hummers Method. ACS Omega, 7, 23503–23510, 2022. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01963>.
- [5] C. Mellado, T. Figueroa, R. Baez, M. Meléndrez, and K. Fernández, Effects of probe and bath ultrasonic treatments on graphene oxide structure. Materials Today Chemistry, 13, 1–7, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2019.04.006>.
- [6] P. Majumder, and R. Gangopadhyay, Evolution of graphene oxide (GO)-based nanohybrid materials with diverse compositions: an overview. RSC Advances, 12, 5686–5719, 2022. <https://doi.org/10.1039/D1RA06731A>.
- [7] L. Sun, Structure and synthesis of graphene oxide. Chinese Journal of Chemical Engineering, 27, 2251–2260, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.05.003>.
- [8] J. Zhao, L. Liu, and F. Li, Fabrication and Reduction. In: Graphene Oxide: Physics and Applications. Springer Briefs in Physics, Springer, Berlin, Heidelberg, 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-662-44829-8_1.
- [9] R. Ikram, B.M. Jan, and W. Ahmad, An overview of industrial scalable production of graphene oxide and analytical approaches for synthesis and characterization. Journal of Materials Research and Technology, 9, 11587–11610, 2020. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2020.08.050>.
- [10] S. Pei, Q. Wei, K. Huang, H.M. Cheng, and W. Ren, Green synthesis of graphene oxide by seconds timescale water electrolytic oxidation. Nature Communications, 9, 1–9, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02479-z>.
- [11] P. Yu, Z. Tian, S.E. Lowe, J. Song, Z. Ma, X. Wang, Z.J. Han, Q. Bao, G.P. Simon, D. Li, and Y.L. Zhong, Mechanically-assisted electrochemical production of graphene oxide. Chemistry of Materials, 28, 8429–8438, 2016. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.6b04415>.
- [12] A. Poniatowska, M. Trzaskowski, and T. Ciach, Production and properties of top-down and bottom-up graphene oxide. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 561, 315–324, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.10.049>.
- [13] N. Kumar, R. Salehiyan, V. Chauke, O. Joseph Botlhoko, K. Setshedi, M. Scriba, M. Masukume, and S. Sinha Ray, Top-down synthesis of graphene: A comprehensive review. FlatChem, 27, 100224, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.FLATC.2021.100224>.
- [14] D.C. Marcano, D. V. Kosynkin, J.M. Berlin, A. Sinitskii, Z. Sun, A. Slesarev, L.B. Alemany, W. Lu, and J.M. Tour, Improved synthesis of graphene oxide. ACS Nano, 4, 4806–4814, 2010. <https://doi.org/10.1021/nn1006368>.
- [15] A.A. Olorunkosebi, M.A. Eleruja, A.V. Adedeji, B. Olofinjana, O. Fasakin, E. Omotoso, K.O. Oyedotun, E.O.B. Ajayi, and N. Manyala, Optimization of graphene oxide through various Hummers' methods and comparative reduction using green approach. Diamond and Related Materials, 117, 108456, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.DIAMOND.2021.108456>.
- [16] N.I. Zaaba, K.L. Foo, U. Hashim, S.J. Tan, W.W. Liu, and C.H. Voon, Synthesis of Graphene Oxide using Modified Hummers Method: Solvent Influence. Procedia Engineering, 184, 469–477, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.118>.
- [17] J. Liu, S. Chen, Y. Liu, and B. Zhao, Progress in preparation, characterization, surface functional modification of graphene oxide: A review. Journal of Saudi Chemical Society, 26, 2022. <https://doi.org/10.1016/J.JSCS.2022.101560>.
- [18] A.M. Dimiev, and J.M. Tour, Mechanism of graphene oxide formation. ACS Nano, 8, 3060–3068, 2014. <https://doi.org/10.1021/nn500606a>.
- [19] M. Cai, D. Thorpe, D.H. Adamson, and H.C. Schniepp, Methods of graphite exfoliation. Journal of Materials Chemistry, 22, 24992–25002, 2012. <https://doi.org/10.1039/c2jm34517j>.
- [20] N. Liu, Q. Tang, B. Huang, and Y. Wang, Graphene Synthesis: Method, Exfoliation Mechanism and Large-Scale Production. Crystals, 12, 25, 2021. <https://doi.org/10.3390/CRYST12010025>.
- [21] R. Yuan, J. Yuan, Y. Wu, L. Chen, H. Zhou, and J. Chen, Efficient synthesis of graphene oxide and the mechanisms of oxidation and exfoliation. Applied Surface Science, 416, 868–877, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.04.181>.
- [22] L.M. Viculis, J.J. Mack, O.M. Mayer, H.T. Hahn, and R.B. Kaner, Intercalation and exfoliation routes to graphite nanoplatelets. Journal of Materials Chemistry, 15, 974–978, 2005. <https://doi.org/10.1039/B413029D>.
- [23] C.-Y. Su, A.-Y. Lu, Y. Xu, F.-R. Chen, A.N. Khlobystov, and L.-J. Li, High-Quality Thin Graphene Films from Fast Electrochemical Exfoliation. ACS Nano, 5, 2332–2339, 2011. <https://doi.org/10.1021/nn200025p>.
- [24] Y. Xu, H. Cao, Y. Xue, B. Li, and W. Cai, Liquid-Phase Exfoliation of Graphene: An Overview on Exfoliation Media, Techniques, and Challenges. Nanomaterials, 8, 942, 2018. <https://doi.org/10.3390/NANO8110942>.
- [25] K. Muthoosamy, and S. Manickam, State of the art and recent advances in the ultrasound-assisted synthesis, exfoliation and functionalization of graphene derivatives. Ultrasonics Sonochemistry, 39, 478–493, 2017. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2017.05.019>.
- [26] Y. Arao, and M. Kubouchi, High-rate production of few-layer graphene by high-power probe sonication. Carbon, 95, 802–808, 2015. <https://doi.org/10.1016/J.CARBON.2015.08.108>.
- [27] A. Ručigaj, J.G. Connell, M. Dular, and B. Genorio, Influence of the ultrasound cavitation intensity on reduced graphene oxide functionalization. Ultrasonics Sonochemistry, 90, 106212, 2022. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2022.106212>.
- [28] G.T.T. Le, N. Chanlek, J. Manyam, P. Opaprakasit, N. Grisdanurak, and P. Sreearunothai, Insight into the ultrasonication of graphene oxide with strong changes

- in its properties and performance for adsorption applications. *Chemical Engineering Journal*, 373, 1212–1222, 2019. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2019.05.108>.
- [29] M. Sabbaghan, H. Charkhan, M. Ghalkhani, and J. Beheshtian, Ultrasonic route synthesis, characterization and electrochemical study of graphene oxide and reduced graphene oxide. *Research on Chemical Intermediates*, 45, 487–505, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11164-018-3613-8>.
- [30] C. Botas, A.M. Pérez-Mas, P. Álvarez, R. Santamaría, M. Granda, C. Blanco, and R. Menéndez, Optimization of the size and yield of graphene oxide sheets in the exfoliation step. *Carbon*, 63, 576–578, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.06.096>.
- [31] S. Kumar, A. Garg, and A. Chowdhuri, Sonication effect on graphene oxide (GO) membranes for water purification applications. *Materials Research Express*, 6, 085620, 2019. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab1ffd>.
- [32] H. Yang, H. Li, J. Zhai, L. Sun, and H. Yu, Simple synthesis of graphene oxide using ultrasonic cleaner from expanded graphite. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 53, 17878–17883, 2014. <https://doi.org/10.1021/ie503586v>.
- [33] S. Kumar, A.K. Ojha, B. Ahmed, A. Kumar, J. Das, and A. Materny, Tunable (violet to green) emission by high-yield graphene quantum dots and exploiting its unique properties towards sun-light-driven photocatalysis and supercapacitor electrode materials. *Materials Today Communications*, 11, 76–86, 2017. <https://doi.org/10.1016/J.MTCOMM.2017.02.009>.
- [34] R. Al-Gaashani, Y. Zakaria, O.S. Lee, J. Ponraj, V. Kochkodan, and M.A. Atieh, Effects of preparation temperature on production of graphene oxide by novel chemical processing. *Ceramics International*, 47, 10113–10122, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2020.12.159>.
- [35] M.J. Yoo, and H.B. Park, Effect of hydrogen peroxide on properties of graphene oxide in Hummers method. *Carbon*, 141, 515–522, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.10.009>.
- [36] D.G. Trikkaliotis, A.C. Mitropoulos, and G.Z. Kyzas, Low-cost route for top-down synthesis of over- and low-oxidized graphene oxide. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 600, 124928, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124928>.
- [37] N. Yadav, and B. Lochab, A comparative study of graphene oxide: Hummers, intermediate and improved method. *FlatChem*, 13, 40–49, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.flatc.2019.02.001>.
- [38] S. Zainab, S. Fraz, S.U. Awan, D. Hussain, S. Rizwan, and W. Mehmood, Optimized time dependent exfoliation of graphite for fabrication of Graphene/GO/GrO nanocomposite based pseudo-supercapacitor. *Scientific Reports* 13, 1–16, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41309-9>.
- [39] M.P. Lavin-Lopez, J.L. Valverde, L. Sanchez-Silva, and A. Romero, Solvent-Based Exfoliation via Sonication of Graphitic Materials for Graphene Manufacture. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 55, 845–855, 2016. <https://doi.org/10.1021/ACS.IECR.5B03502>.
- [40] D. Konios, M.M. Stylianakis, E. Stratakis, and E. Kymakis, Dispersion behaviour of graphene oxide and reduced graphene oxide. *Journal of Colloid and Interface Science*, 430, 108–112, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2014.05.033>.
- [41] S. Thakur, and N. Karak, Green reduction of graphene oxide by aqueous phytoextracts. *Carbon*, 50, 5331–5339, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.07.023>.
- [42] N. Kumar, and V.C. Srivastava, Simple Synthesis of Large Graphene Oxide Sheets via Electrochemical Method Coupled with Oxidation Process. *ACS Omega*, 3, 10233–10242, 2018. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b01283>.
- [43] J. Guerrero-Contreras, and F. Caballero-Briones, Graphene oxide powders with different oxidation degree, prepared by synthesis variations of the Hummers method. *Materials Chemistry and Physics*, 153, 209–220, 2015. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHEMPHYS.2015.01.005>.
- [44] G.Q. Qi, J. Cao, R.Y. Bao, Z.Y. Liu, W. Yang, B.H. Xie, and M.B. Yang, Tuning the structure of graphene oxide and the properties of poly(vinyl alcohol)/graphene oxide nanocomposites by ultrasonication. *Journal of Materials Chemistry A*, 1, 3163–3170, 2013. <https://doi.org/10.1039/C3TA01360J>.
- [45] Z. Baig, O. Mamat, M. Mustapha, A. Mumtaz, K.S. Munir, and M. Sarfraz, Investigation of tip sonication effects on structural quality of graphene nanoplatelets (GNPs) for superior solvent dispersion. *Ultrasonics Sonochemistry*, 45, 133–149, 2018. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2018.03.007>.
- [46] M.F.R. Hanifah, J. Jaafar, M. Aziz, A.F. Ismail, M.A. Rahman, and M.H.D. Othman, Synthesis of Graphene Oxide Nanosheets via Modified Hummers's™ Method and Its Physicochemical Properties. *Jurnal Teknologi*, 74, 195–198, 2015. <https://doi.org/10.11113/JT.V74.3555>.
- [47] T. Soltani, and B. Kyu Lee, A benign ultrasonic route to reduced graphene oxide from pristine graphite. *Journal of Colloid and Interface Science*, 486, 337–343, 2017. <https://doi.org/10.1016/J.JCIS.2016.09.075>.
- [48] D.T. Phan, and G.S. Chung, P–n junction characteristics of graphene oxide and reduced graphene oxide on n-type Si(111). *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 74, 1509–1514, 2013. <https://doi.org/10.1016/J.JPCS.2013.02.007>.
- [49] A. Mathkar, D. Tozier, P. Cox, P. Ong, C. Galande, K. Balakrishnan, A. Leela Mohana Reddy, and P.M. Ajayan, Controlled, Stepwise Reduction and Band Gap Manipulation of Graphene Oxide. *The Journal of*

- Physical Chemistry Letters, 3, 986–991, 2012. <https://doi.org/10.1021/jz300096t>.
- [50] P. Makuła, M. Pacia, and W. Macyk, How To Correctly Determine the Band Gap Energy of Modified Semiconductor Photocatalysts Based on UV-Vis Spectra. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 9, 6814–6817, 2018. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.8b02892>
- [51] A.H. de Lima, C.T. Tavares, C.C.S. da Cunha, N.C. Vicentini, G.R. Carvalho, B. Fragneaud, I.O. Maciel, C. Legnani, W.G. Quirino, L.F.C. de Oliveira, F. Sato, and J.P.A. de Mendonça, Origin of optical bandgap fluctuations in graphene oxide. *The European Physical Journal B*, 93, 1–12, 2020. <https://doi.org/10.1140/EPJB/E2020-100578-7>
- [52] N. Sharma, S. Tomar, M. Shkir, R. Kant Choubey, and A. Singh, Study of Optical and Electrical Properties of Graphene Oxide. *Materials Today: Proceedings*, 36, 730–735, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.04.861>.
- [53] P. Gangwar, S. Singh, and N. Khare, Study of optical properties of graphene oxide and its derivatives using spectroscopic ellipsometry. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 124, 1–8, 2018. <https://doi.org/10.1007/S00339-018-1999-1>.
- [54] K.O. Olumurewa, B. Olofinjana, O. Fasakin, M.A. Eleruja, E.O.B. Ajayi, K.O. Olumurewa, B. Olofinjana, O. Fasakin, M.A. Eleruja, and E.O.B. Ajayi, Characterization of High Yield Graphene Oxide Synthesized by Simplified Hummers Method. *Graphene*, 6, 85–98, 2017. <https://doi.org/10.4236/GRAPHENE.2017.64007>.
- [55] Fauzia, M.A. Khan, M. Chaman, and A. Azam, Antibacterial and sunlight-driven photocatalytic activity of graphene oxide conjugated CeO₂ nanoparticles. *Scientific Reports*, 14, 1–17, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54905-0>.
- [56] C. Aydin, H. Aydin, M. Taskin, and F. Yakuphanoglu, A Novel Study: The Effect of Graphene Oxide on the Morphology, Crystal Structure, Optical and Electrical Properties of Lanthanum Ferrite Based Nano Electroceramics Synthesized by Hydrothermal Method. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 19, 2547–2555, 2018. <https://doi.org/10.1166/JNN.2019.15841>.
- [57] A.C. Ferrari, Raman spectroscopy of graphene and graphite: Disorder, electron–phonon coupling, doping and nonadiabatic effects. *Solid State Communications*, 143, 47–57, 2007. <https://doi.org/10.1016/J.SSC.2007.03.052>.
- [58] M. PriyaDarshani, and R. Sharma, Controlling the bandgap of graphene oxide via varying KMnO₄. *Optical Materials*, 147, 114634, 2024. <https://doi.org/10.1016/J.OPTMAT.2023.114634>.
- [59] K. Haubner, J. Murawski, P. Olk, L.M. Eng, C. Ziegler, B. Adolphi, and E. Jaehne, The Route to Functional Graphene Oxide. *ChemPhysChem*, 11, 2131–2139, 2010. <https://doi.org/10.1002/CPHC.201000132>.
- [60] S. Claramunt, A. Varea, D. López-Díaz, M.M. Velázquez, A. Cornet, and A. Cirera, The importance of interbands on the interpretation of the raman spectrum of graphene oxide. *Journal of Physical Chemistry C*, 119, 10123–10129, 2015. <https://doi.org/10.1021/ACS.JPCC.5B01590>.
- [61] S. Eigler, and A. Hirsch, Chemistry with Graphene and Graphene Oxide—Challenges for Synthetic Chemists. *Angewandte Chemie International Edition*, 53, 7720–7738, 2014. <https://doi.org/10.1002/ANIE.201402780>
- [62] M. Sieradzka, C. Ślusarczyk, W. Biniaś, and R. Fryczkowski, The Role of the Oxidation and Reduction Parameters on the Properties of the Reduced Graphene Oxide. *Coatings*, 11, 166, 2021. <https://doi.org/10.3390/COATINGS11020166>
- [63] K. Krishnamoorthy, M. Veerapandian, K. Yun, and S.J. Kim, The chemical and structural analysis of graphene oxide with different degrees of oxidation. *Carbon*, 53, 38–49, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.10.013>.
- [64] A.I. Abd-Elhamid, H.F. Aly, H.A.M. Soliman, and A.A. El-Shanshory, Graphene oxide: Follow the oxidation mechanism and its application in water treatment. *Journal of Molecular Liquids*, 265, 226–237, 2018. <https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2018.05.127>.
- [65] Q. Guo, S. Chen, and X. Qin, ZnO–SnO₂/graphene composites as high capacity anode materials for lithium ion batteries. *Materials Letters*, 128, 50–53, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.04.096>
- [66] R. Muzyka, M. Kwoka, Ł. Smędowski, N. Dzię, and G. Gryglewicz, Oxidation of graphite by different modified Hummers methods. *New Carbon Materials*, 32, 15–20, 2017. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(17\)60102-1](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(17)60102-1).
- [67] Y. Hou, S. Lv, L. Liu, and X. Liu, High-quality preparation of graphene oxide via the Hummers’ method: Understanding the roles of the intercalator, oxidant, and graphite particle size. *Ceramics International*, 46, 2392–2402, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.09.231>.
- [68] A. Asadi, F. Pourfattah, I. Miklós Szilágyi, M. Afrand, G. Żyła, H. Seon Ahn, S. Wongwises, H. Minh Nguyen, A. Arabkoohsar, and O. Mahian, Effect of sonication characteristics on stability, thermophysical properties, and heat transfer of nanofluids: A comprehensive review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 58, 104701, 2019. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2019.104701>.
- [69] S. An, Graphene Oxides in Water: Characterization, Reactivity, and Application. PhD Thesis, McKelvey School of Engineering, USA, 2018. <https://doi.org/https://doi.org/10.7936/qgbq-fy39>.





Görme bozukluğu olan bireyler için derin öğrenme tabanlı ürün sınıflandırma sistemi

Deep learning based product classification for individuals with visual impairment system

Fatma Betül Keskin¹ , Nursena Baygın² , Işıl Karabey Aksakallı^{3,*} , Özlem Sökmen⁴ 

^{1,2,3} Erzurum Teknik Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 25040, Erzurum, Türkiye

⁴ Erzurum Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 25040, Erzurum, Türkiye

Öz

Görme bozukluğuna sahip bireylerin sosyal yaşama adapte olma düzeylerini ve bağımsızlık duygularını artırmaya yönelik yapılan araştırmalar toplumsal katkı açısından oldukça önemlidir. Söz konusu bireylerin alışveriş deneyimlerini kolaylaştırmak yapılan çalışmalar arasındadır. Bu alanda yapılan araştırmalar, alışveriş ürünlerinin sınıflandırılması ve rafların tanıtılması için genellikle geleneksel yöntemlerin kullanıldığını göstermektedir. Önerilen bu çalışmada, market raflarındaki ürünler geleneksel yöntemlerden farklı olarak derin yapay sinir ağları kullanılarak sınıflandırılmıştır. Ayrıca, görme bozukluğuna sahip bireylere kolaylık sağlamak amacıyla çalışmanın ikinci fazında geliştirilecek olan günlük hayatta kullanılan akıllı cihazlara entegre edilebilen ve tüm mobil işletim sistemlerini destekleyen Flutter altyapısı tercih edilecektir. Uygulama Erzurum ilinde bulunan bir marketten elde edilen 2222 görüntü, 14 farklı kategorideki veri setini oluşturularak gerçekleştirilmiştir. Kategori bazlı verinin dengeli sayıda olması için internet kaynağından alınan görüntüler ile birlikte toplam 4585 adet görüntü, YOLOv5, YOLOv8 ve EfficientDet D7TF2 modelleriyle eğitilerek sınıflandırılmıştır. Yapılan deneylerde YOLOv8 modeli, %92,8 doğruluk, %98,6 hassasiyet, %95 duyarlılık ve %96,8 F1 skoru ile diğer yöntemlere oranla daha yüksek performans göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Görme bozukluğu, Yapay zekâ tabanlı ürün tanıma, Görüntü işleme, Derin öğrenme

1 Giriş

Görme bozukluğuna sahip bireyler, günlük yaşamlarında çeşitli zorlukla karşılaşmaktadır. Bu zorluklar arasında konum belirleme, nesnelere algılama, para birimlerini tanıma, otobüs numaralarını görme, alışverişte ürün raflarını tanıma gibi basit aktiviteler bulunmaktadır. Bu tür zorlukların yanı sıra, engellerle dolu veya güvensiz kaldırımlar gibi durumlar, görme bozukluğuna sahip bireylerin hareketlilik durumunu olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu durumların sonucunda, bireylerde

Abstract

Investigations to increase the level of adaptation to social life and the sense of independence of individuals with visual impairment are very important in terms of social contribution. Facilitating the shopping experiences of these individuals can be among these studies. Research in this field shows that traditional methods are generally used to classify shopping products and to introduce the shelves. In this proposed study, products on supermarket shelves are classified using deep artificial neural networks different from traditional methods. In addition, in order to provide convenience to individuals with visual impairments, the Flutter infrastructure, which can be integrated into smart devices used in daily life and supports all mobile operating systems, will be preferred in the second phase of the study. The application was realized by creating a data set of 2222 images obtained from a market in Erzurum province and 14 different categories. In order to have a balanced number of category-based data, a total of 4585 images were trained and classified with YOLOv5, YOLOv8 and EfficientDet D7TF2 models. In the experiments, YOLOv8 model outperformed the other methods with 92.8% accuracy, 98.6% precision, 95% sensitivity and 96.8% F1 score.

Keywords: Visual impairment, Artificial intelligence-based product recognition, Image processing, Deep learning

düşme, çarpma veya geç kalma korkusu gibi psikolojik tepkiler gelişebilmektedir. Ayrıca bağımlı davranışlar sergileme ve toplumda kabul görmede zorlanma gibi durumlarla da karşılaşabilmektedir [1].

Dünya Sağlık Örgütü'ne [2] göre, dünya genelinde yaklaşık 1,3 milyar bireyin görme bozukluğundan etkilendiği tahmin edilmektedir. Bu bireylerin 188,5 milyonu hafif, 217 milyonu orta ila şiddetli ve 36 milyonu ise tamamen görme engelli durumundadır [3]. Medical Express'e [4] göre, nüfusun artması ve yaşlanması ile birlikte, 2050 yılında görme engelli birey sayısının 36

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: isil.karabey@erzurum.edu.tr (I. Karabey Aksakallı)

Geliş / Received: 14.10.2023 Kabul / Accepted: 17.0.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1375785

milyondan 115 milyona çıkacağı tahmin edilmektedir. Bu artış, görme engelli bireyler için daha efektif yardımlara yönelik acil ihtiyaçları da beraberinde getirmektedir. Görme bozukluğu olan insanların çoğu, günlük görevleri için bir tür destekleyici teknolojiye ihtiyaç duymaktadır. Destekleyici Teknoloji (DT), herhangi bir yetersizliğe ve/veya bozukluğa sahip bireyler tarafından işlevsel yeteneklerini geliştirmek için kullanılan bir cihaz, ürün, öge veya yazılım programı olarak tanımlanabilmektedir [5].

Görme bozukluğuna sahip bireylerin yaşadığı sorunları azaltmak veya en aza indirmek amacıyla bilim insanları ve firmalar tarafından farklı teknolojik cihaz ve uygulamalar geliştirilmektedir. Bu bağlamda, görme bozukluğuna sahip bireylerin çevrelerindeki nesnelere algılayabilmesi için çeşitli çalışmalar yapılmıştır [6-8]. Sensörler ve lazer ışınlarını kullanan akıllı bastonlar gibi çözümler geliştirilerek görme bozukluğuna sahip bireylere yardımcı olunması amaçlanmıştır [6]. Gbenga ve ark. [7] tarafından görme bozukluğuna sahip bireyler için ultrasonik sensörler ve Arduino üzerinde geliştirilen akıllı bastonlar bu cihazlara örnek olarak sunulabilir. Ayrıca Kaur ve Bhattacharya [8], görme engelli bireylere sesli geri bildirim yoluyla çevre algısı sağlamak amacıyla nesnelere tespiti, sınıflandırılması ve konum tahmini üzerine bir sistem geliştirmişlerdir. Geliştirilen düşük maliyetli, hafif ve kolayca taşınabilir özelliklere sahip olan sistem Odroid kartı, USB kamera ve USB lazer entegrasyonu ile oluşturulmuştur. Kullanıcı geri bildirimlerine dayanarak optimize edilmiş olan uygulamada nesne tespiti, çok modlu özellik füzyonunu kullanan derin öğrenme mimarisi ile gerçekleştirilmiş olup, deneysel sonuçlar çeşitli veri setleri ile doğrulanmıştır.

Microsoft iOS uygulaması ile metni tanımlamak ve seslendirmek için akıllı telefon kamerasını kullanmaktadır [9]. Bu uygulama barkod okuyabilme, ürün bilgilerini sağlayabilme, sahneleri veya nesnelere tanımlayabilme özelliklerine sahiptir. Ayrıca bu uygulama insanları tanıyabilme ve resimlerden metin okuyabilme özelliğine de sahiptir [10]. Benzer şekilde, IPPLEX LookTel Money Reader uygulaması, görme bozukluğuna sahip kullanıcıların farklı para birimlerini tanımasına olanak tanımaktadır [11]. Bu uygulama, iOS cihazının kamerasıyla bir faturanın fotoğrafını çekerek para biriminin değerini sesli olarak bildirmekte ve kullanıcının parasını yardım almadan saymasına olanak tanımaktadır. VizWiz by ROCHCI uygulaması ise kullanıcıların fotoğraf çekmesine ve görüntü hakkında sorular sormasına olanak tanımaktadır [12]. Bu uygulama, soruların gönüllü bireylere e-posta ya da Twitter aracılığıyla gönderebileceği ve kullanıcıların genellikle dakikalar hatta saniyeler içinde yanıtlarını alabileceği bir platform sunmaktadır. Bir başka uygulama olan SayText by Norfello Oy, görüntü içindeki metni taramakta ve yüksek sesle okumaktadır [13]. Bu uygulama metin analizi için Optik Karakter Tanıma (OCR) teknolojisini kullanmakta ve kullanıcıların ekranı kaydırarak belgeyi dinlemelerine olanak tanımaktadır. TetraMail uygulaması ise görme bozukluğuna sahip bireylerin sesli komutları kullanarak e-postaları kontrol etmelerine ve yanıtlamalarına yardımcı olmak için tasarlanmış bir e-posta istemcisidir [14]. Bu uygulama dokunmatik ve ses tabanlı etkileşim sunarak

görme bozukluğuna sahip bireyler için kullanıcı dostu bir uygulama haline gelmiştir. Literatürde ve endüstride yer alan bu cihazlar çevreden gelen bilgileri algılayarak ses veya titreşim gibi geri bildirimler sağlamaktadır.

Tayland Mahidol Üniversitesi tarafından yapılan bir çalışmada [15] görme bozukluğuna sahip bireylerin alışveriş sırasında karşılaştığı yaygın problemleri incelenmiştir. Bu çalışmaya göre, bu bireylerin özellikle ürün fiyatlarına, porsiyon büyüklüklerine, içerik bilgilerine ve besin değerlerine erişimde zorluk yaşadıkları gözlemlenmiştir. Benzer şekilde literatürde yer alan bir başka çalışmada [16], alışveriş merkezlerindeki yoğunlukların ve tatil veya indirim günleri gibi durumlarda artan kuyrukların, insanlardaki stres düzeyini artırdığı gözlemlenmiştir. Bu durumdan yaşam kalitesi düşük olan görme bozukluğuna sahip bireyler daha fazla etkilenmekte ve bekleme süreleri ile orantılı olarak kaygı düzeylerinde de artış durumu ortaya çıkmaktadır. Bu durum ise görme bozukluğuna sahip bireylerin sosyal hayata daha zor entegre olmalarına neden olmaktadır. Normal müşterilerin bağımsız olarak alışveriş yapmaları ve bu süreçte mağaza içi ipuçlarından yararlanmaları beklenmektedir. Ancak ileri görme bozukluğuna sahip bireyler için bu durum olası değildir. Bir mağazada gezinme ve satış görevlilerinin yardımına güvenme çabası bu tüketicilerin yaşadığı normallik derecesini azaltmaktadır [17].

Son zamanlarda yapay zekâ teknolojisindeki gelişmelerle birlikte, görme bozukluğuna sahip bireylere yönelik görsel tanıma yetenekleri önemli ölçüde artış göstermiştir. Ancak bu uygulama ve teknolojilerin günlük hayatta kullanılabilirliği hala beklenen düzeye ulaşamamıştır ve mevcut yazılımlar yaygın olarak kullanılamamaktadır. Örneğin, görüntü tanıma motorları [18], net bir görüntü ve bağlamsal anlayış gerektiren bilgilerin sağlanmasını gerektirmektedir. Görme bozukluğuna sahip bireylerin yaşadığı zorlukları azaltmak ve günlük hayatlarını kolaylaştırmak için teknolojinin daha fazla kullanılması oldukça önemlidir. Geliştirilen projeler ve uygulamalar, görme bozukluğuna sahip bireylerin yaşam kalitesini artırabilir ve onlara bağımsızlık sağlayabilir. Ancak, bu alanda yapılan çalışmalar günlük hayatta ek donanım gerektirdiğinden sıklıkla tercih edilmemektedir.

Önerilen bu çalışmada, mobil cihaz dışında herhangi bir ek donanıma ihtiyaç duyulmadan bireylerin nesnelere algılaması ve alışveriş sırasında bağımsız hareket etmeleri amaçlanmıştır. Araştırma kapsamında, market raflarındaki ürünlerin bir mobil kameradan okutularak yapay zekâ algoritmaları ile kullanıcıya sesli geri bildirim ve büyük boyutlu görsel olarak sunulması hedeflenmiştir.

Gerçekleştirilen bu çalışmanın temel katkıları ve motivasyon kaynakları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Akıllı mobil cihaz aracılığıyla gerçek hayattan veri toplama, ürün-rafları tespit etme.
- Elde edilen görüntülerin, görme bozukluğuna sahip bireylerin günlük yaşam aktivitelerini kolaylaştırmak adına market ürünlerini tanıma konusunda yardımcı olma

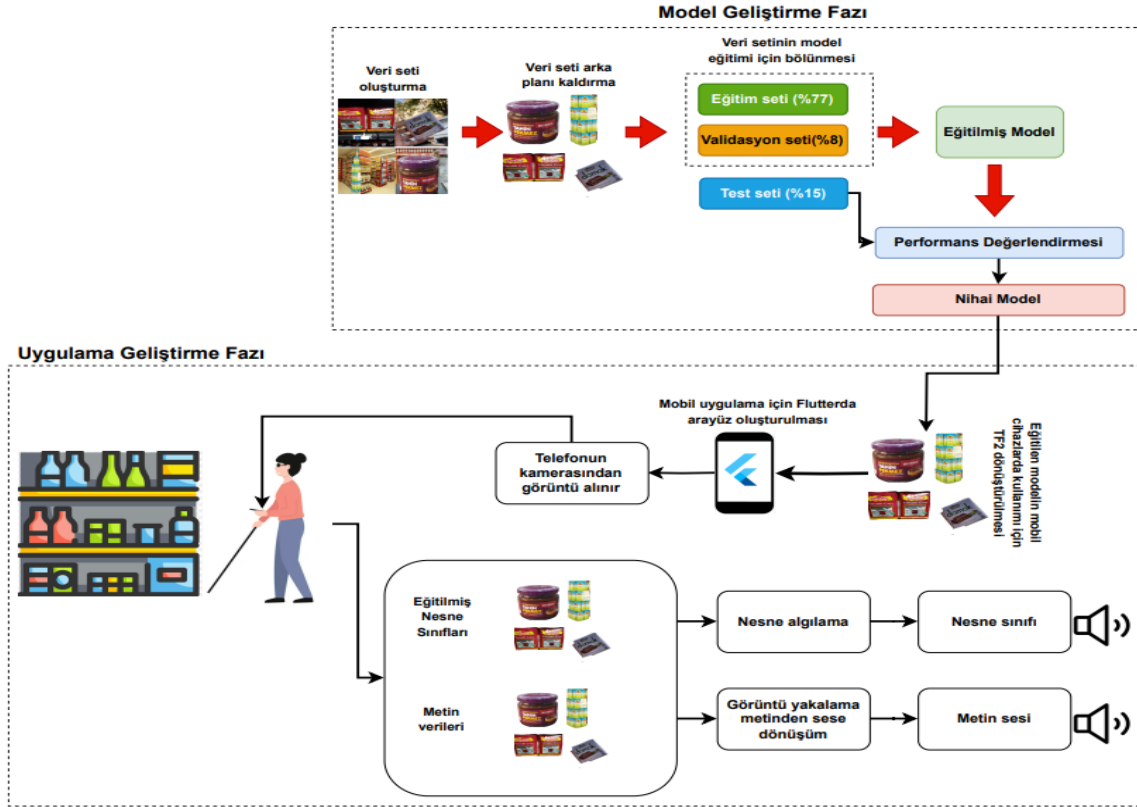
- Yapay zekâ tabanlı nesne tespiti ile görme bozukluğuna sahip bireylerin sosyal hayata bağımsız bir şekilde adapte olmalarını sağlama

Bu çalışmanın sonraki bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 2’de, önerilen çalışmanın yöntemi ve kullanılan materyaller detaylandırılmıştır. Bölüm 3’te, veri setinin oluşturulmasına dair bilgiler sunulmuştur. Bölüm 4’te, önerilen yöntemin deneysel sonuçlarına yer verilmiştir. Bölüm 5’te önerilen yöntemin uygulanma aşamaları incelenmiş ve elde edilen sonuçlar üzerinde değerlendirme yapılmıştır. Son olarak Bölüm 6’da ise çalışmadan elde edilen genel sonuçlar özetlenmiştir.

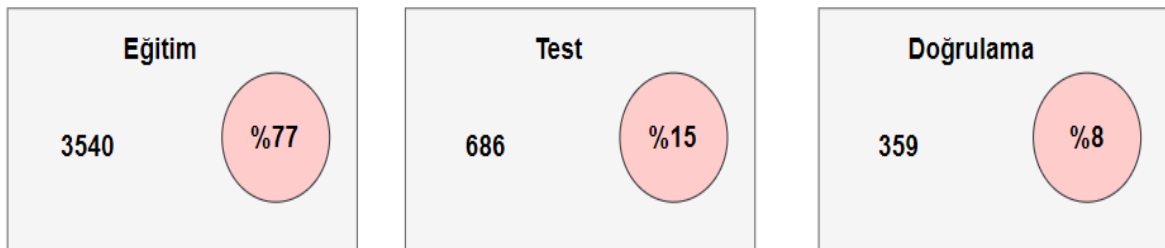
2 Materyal ve metot

Bilgisayarlı görü alanında önemli bir konu olan nesne algılama, hareketli nesne takibi [19], güvenlik kameralarında otomatik silah ve bıçak tespit sistemi [20], su ürünleri

yetiştiriciliği için balık davranışlarının bilgisayarlı görüntü işleme yöntemleriyle izlenmesi [21] gibi birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise market raflarındaki ürünleri algılamak için görüntü işleme yöntemleri ile derin öğrenme tabanlı sinir ağıları kullanılmıştır. İlk olarak marketlerden gerçek görseller elde edilerek veri toplama süreci gerçekleştirilmiştir. Ardından, eğitim aşaması için bu veriler kullanılarak bir yapay zekâ modeli oluşturulmuştur. Model, market raflarındaki ürünleri algılayıp tanımak için eğitilmiştir. Önerilen yöntem, geliştirilen bir mobil uygulama aracılığıyla görme bozukluğuna sahip kullanıcıların kameralarını ürünlere doğrultarak ürünleri tanıyabilmelerine ve ürün detaylarına sesli olarak erişebilmelerine olanak tanımaktadır. Araştırma kapsamında önerilen yöntemi özetleyen bir blok diyagram Şekil 1’de sunulmaktadır.



Şekil 1. Önerilen yöntemin akış diyagramı



Şekil 2. Elde edilen veri setinin eğitim, test ve doğrulama kümelerine ayrılma oranları

Şekil 1’de görüldüğü üzere önerilen yöntem model geliştirme fazı ve uygulama geliştirme fazı olmak üzere iki aşamadan meydana gelmektedir. Model geliştirme fazında veri seti oluşturma, eğitim-test işlemleri ve performans değerlendirme süreçleri yer almaktadır. Uygulama geliştirme fazında ise geliştirilen mobil uygulama üzerinden nesne sınıflandırılması yapılacaktır.

2.1 Eğitim modelleri

Araştırmanın eğitim aşaması için “YOLOv5”, “YOLOv8” ve “EfficientDet D7 Tensorflow 2” olmak üzere üç farklı model kullanılmıştır. Bu modeller alt bölümlerde detaylı bir şekilde sunulmuştur.

2.1.1 YOLOv5

YOLOv5 [22] nesne algılama ve sınıflandırma için kullanılan bir derin öğrenme modelidir. Görsel verilerde nesnelere belirlemek için hızlı ve etkili bir yaklaşım sunmaktadır. YOLOv5 PyTorch çerçevesi üzerine kurulmuş bir mimariye sahip olup, GPU hızlandırmasını kullanarak gerçek zamanlı nesne algılama yetenekleri sunmaktadır. YOLOv5 geliştiricilere kolaylık sağlamak için önceden eğitilmiş ağırlıklar ve örnek veri kümelerini birlikte sunmaktadır. Ayrıca bu algoritma ile kişiselleştirilmiş veri kümeleri kullanılarak da özelleştirilmiş nesne tespiti modelleri eğitebilmektedir. YOLOv5, farklı boyutlarda (tiny, small, medium, large) modeller sunmakta ve çeşitli veri seti boyutlarına uygulanabilmektedir.

2.1.2 YOLOv8

YOLOv8 [23], YOLO serisinin bir versiyonudur ve önceki sürümlerin gelişmiş versiyonudur. Bu algoritma, önceden eğitilmiş evrişimli bir sinir ağı modeli kullanmakta ve görüntüyü farklı ölçeklerde analiz etmektedir. Ardından her ölçekteki tespitleri birleştirmekte ve sonuç olarak nesnelere konumlarını ve sınıflarını vermektedir. YOLOv8, yüksek doğruluk ve hızlı işleme performansı sağlayarak doğru sonuçlar elde etmek için farklı ölçeklerdeki özellik haritalarını birleştirmektedir. Önerilen bu çalışmada, “YOLOv8” modellerinden “YOLOv8s” modeli kullanılmıştır. Bu modelin parametreleri Tablo 1’de karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

2.1.3 EfficientDet (D7) Tensorflow 2

EfficientDet [25] mimarisi Google Brain Team tarafından yazılmış olup sınıflandırma için kullanılan ImageNet görüntü veri tabanında önceden eğitilmiş evrişimli bir sinir ağı olan EfficientNet tabanlıdır. EfficientDet, belirli ayrıntı düzeylerinde görüntünün bölümlerini havuzlayarak ve karıştırarak, NAS-FPN özellikli bir füzyon katmanından geçirilmiş özellikleri oluşturmaktadır. NAS-FPN çeşitli özellikleri, değişen ayrıntı düzeylerinde birleştirmekte ve daha sonra bu özellikleri sınırlayıcı kutuların ve sınıf etiketlerinin tahmin edildiği algılama bölümüne iletmektedir. EfficientDet-D7 [26] modeli, EfficientNet ana yapısıyla birlikte, önceden

eğitilmiş ImageNet veri seti üzerinde eğitilmiş olup birçok günlük nesneyi algılayabilmektedir.

3 Veri toplama

Bu çalışma için oluşturulan veri seti, Erzurum ilinde yer alan Düzgün Marketler zincirinin mağaza raflarında bulunan ürünlerin fotoğraflarından meydana gelmektedir. Bu fotoğraflar mağaza rafında bulunan ürünlerin buldukları yerlerde, daha sonra ise beyaz bir karton üzerinde çekilerek elde edilmiştir. Fotoğraf çekimi Xiaomi Mi 10T Pro ve Oppo A72 cihazları ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra fotoğraflar roboflow ortamına jpeg formatında yüklenmiş ve etiketlemeler yapılmıştır. Çalışma öncesinde marketler zinciri yöneticisinden yazılı izin alınmıştır. Bu veri setinde toplam 14 farklı kategoride 2222 görüntü yer almaktadır. Her kategoriden verinin nispeten dengeli olması için veri seti internet üzerinden Google lens kullanılarak örnek bir resim verilip benzer resimler çekilerek genişletilmiştir. Bu işlem sonucu toplamda 4585 görüntü elde edilmiş ve deneysel çalışmalar bu görüntüler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 2’de görüldüğü üzere verilerin %77’si eğitim, %15’i test ve %8’i doğrulama için kullanılmıştır.

Tablo 1. YOLOv8 modellerinin karşılaştırılması [24]

Model	Boyut	mAP	Hız (ms)	Param (M)	Düşme (B)
YOLOv8n	640	37.3	80.4	3.2	8.7
YOLOv8s	640	44.9	128.4	11.2	28.6
YOLOv8m	640	50.2	234.7	25.9	78.9
YOLOv8l	640	52.9	375.2	43.7	165.2
YOLOv8x	640	53.9	479.1	68.2	257.8

Tablo 2’de veri setindeki verilerin genişletilme öncesindeki sayı ve kategorik durumu verilmiştir. Ürün fotoğrafları market sahibinin izni ile çekilmiş daha sonra arka planlar temizlenerek ön işleme yapılmıştır. Bazı görüntülerde ise arka plan temizlenmeden market görünümü olarak kullanılmıştır.

Tablo 2. Oluşturulan veri küme kategorileri ve adetleri

Kategori	Adet
Bal	123
Çay	104
Çikolata	245
Helva	265
Makarna	158
Peynir	185
Poşet	315
Reçel	112
Su	128
Süt	120
Şehriye	157
Tahin	103
Yağ	126
Zeytin	111

Eğitim Veri Seti



Şekil 3. Eğitim verilerinin bir bölümü

Test Veri Seti



Şekil 4. Test verilerinin bir bölümü

Validasyon Veri Seti



Şekil 5. Doğrulama verilerinin bir bölümü

Veri setini çoğaltma işlemlerinden sonra eğitimde kullanılan verilerin bir kısmı Şekil 3'te sunulmuştur. Veri setinin %77'lik bir bölümü eğitim modeline ayrılmıştır. Toplanan veri setinin genişletilmesi işlemlerinden sonra test ve doğrulama için kullanılan verilerin bir bölümü sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te sunulmuştur. Test aşaması için toplam veri setinin %15'i, doğrulama için ise veri setinin %8'i kullanılmıştır.

4 Deneysel Sonuçlar

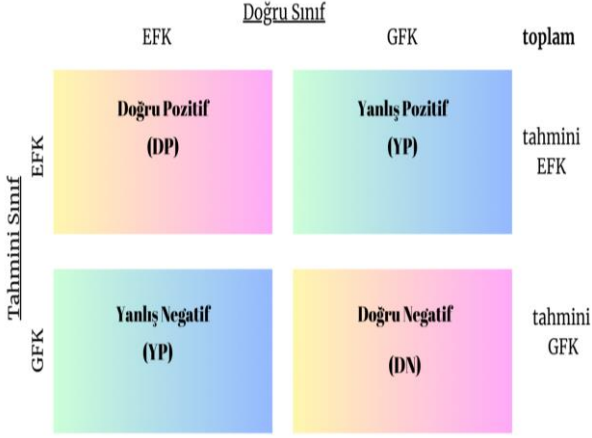
Toplanan veri setinde çoğaltma sonrası elde edilen toplam 4585 görüntünün %77'si eğitim, %15'i test ve kalan %8'i ise doğrulama için kullanılmıştır. Veri setinin eğitim, test ve doğrulama kümelerine ayrılma sürecinde Roboflow kullanılmıştır. Roboflow uygulamasında veri seti

bölünürken her kategoriden dengeli sayıda veri otomatik olarak alınmaktadır. Elde edilen hassasiyet-güven eğrileri incelendiğinde kategori bazlı sınıflandırma doğruluğunun artışı veri setinin ortalama olarak eşit bir şekilde dağıldığını göstermektedir. Elde edilen hassasiyet-güven eğrileri incelendiğinde kategori bazlı sınıflandırma doğruluğunun arttığı görülmekte; bu da veri setinin dağılımının ortalama olarak eşit olduğunu göstermektedir. Kullanılan derin sinir ağlarının performanslarını karşılaştırmak amacıyla doğruluk, hassasiyet, duyarlılık ve F1 skor değerleri aşağıda alt başlıklar halinde açıklanmıştır.

4.1 Karışıklık matrisi

Karışıklık matrisi, sınıflandırma modellerinin performansını değerlendirmek için oluşturulmaktadır. Bir

sınıflandırma modeli, gerçek değerler ile tahmin edilen değerler arasındaki ilişkiyi görselleştirmek için kullanılan tablodur. Karışıklık matrisinin hesaplanmasında yer alan metrikler Şekil 6'da gösterilmiştir. Karışıklık matrisi DP, DN, YP ve YN olmak üzere dört temel terimi içermektedir.



Şekil 6. Performans değerlendirme metrikleri

Karışıklık matrisi; modelin doğruluk, hassasiyet, özgünlük ve F1 skoru gibi diğer performans metriklerini hesaplamak için kullanılmaktadır. Şekil 6'da verilen metrikler kullanılarak karışıklık matrisi hesaplanmış ve Şekil 7 ile sunulan sınıflandırma sonuçları her kategori için ayrı ayrı gösterilmiştir. Değerlendirme metriklerinin yüzdeleri ise Tablo 3'te verilmiştir.

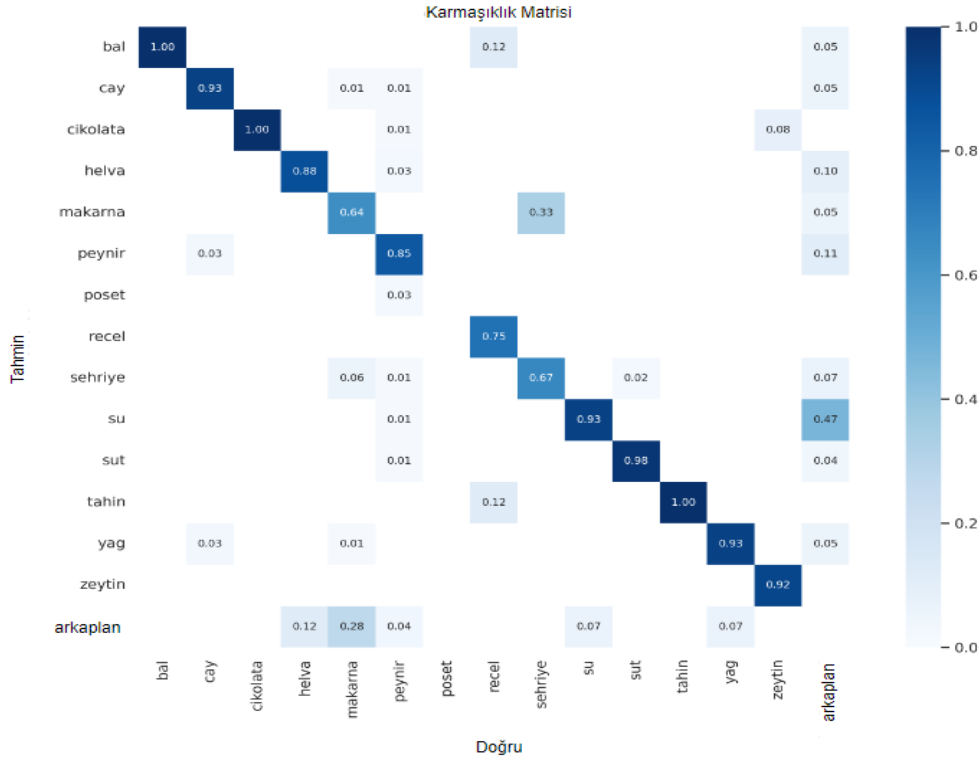
Tablo 3. Performans metriklerinin modellere göre karşılaştırılması

Metrik	YOLOv5	EfficientDet D7TF2	YOLOv8
Hassasiyet	%91.7	%45.2	%98.6
Duyarlılık	%97	%68.3	%95
Doğruluk	%78.3	%55.9	%92.8
F1 Skor	%73	%54.5	%96.79
mAP	%69	%87	%98
Epoch sayısı	250	250	250
Batch sayısı	16	16	16

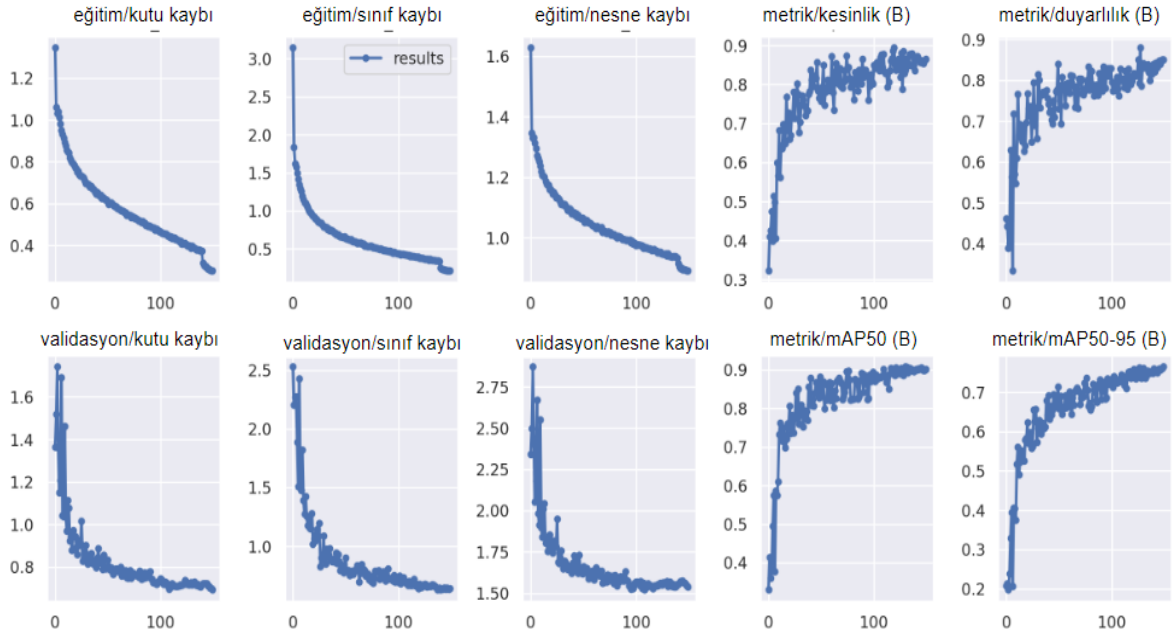
Yapılan çalışmada, Tablo 4'te görüldüğü üzere adım (epoch) sayısının artmasına rağmen, en iyi sonuçlara 250 adım sayısında erişildiği tespit edilmiştir. Ayrıca pencere sayısı 8, 16, 32 ve 64 olarak tüm adımlarda çalıştırılmış olup batch sayıları içerisinde pencere sayısı artsa da en iyi sonucu veren YOLOv8 algoritmasında 16 batch boyutundan sonra iyileştirici değişimler elde edilmediği için pencere sayısı olarak 16'ya karar verilmiştir. Diğer yöntemlerde ise 16 batch ve 250 adımdan sonraki 32 ve 64 batch değerlerinde düşüş gözlenmiştir.

Tablo 4. Farklı epoch ve batch değerlerine göre eğitim modellerinin doğruluk oranları

	Epoch/Batch	8	16	32	64
YOLOv5	50	%56.2	%65.7	%68.1	%60.7
	150	%63.8	%73.2	%73.9	%66.3
	250	%68.5	%78.3	%74.8	%72.4
Efficient Det (D7)	50	%31.2	%48	%49	%37
	150	%39	%52	%51	%40.7
	250	%37	%55.9	%54	%43
YOLOv8	50	%72.9	%74.7	%78.7	%80
	150	%82	%84.7	%82.1	%80
	250	%84	%85	%85	%85



Şekil 7. YOLOv8 model eğitimi-örnek bir karışıklık matrisi



Şekil 8. mAP değerleri görüntüsü

Tablo 3'te eğitim modellerinin hassasiyet, doğruluk, duyarlılık, F1 skor değeri, map değerleri, epoch ve batch sayıları karşılaştırılmıştır. Tablodaki sonuçlara göre en iyi sonuç YOLOv8 ile elde edildiği için eğitim modeli olarak v8 seçilmiştir. YOLOv8 modelinden elde edilen ortalama hata performansı; kesinlik ve duyarlılık metriklerine göre incelenmiş ve Şekil 8'de sunulmuştur.

4.2 Doğruluk (Accuracy)

Doğruluk, bir sınıflandırma modelinin doğru tahminlerinin toplam verilere oranını ifade eden bir performans metriğidir. Doğruluk, modelin genel tahmin yeteneğini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Doğruluk metriği, Denklem 1'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\text{Doğruluk} = (\text{Doğru Tahminler}) / (\text{Toplam Veri Sayısı})$$

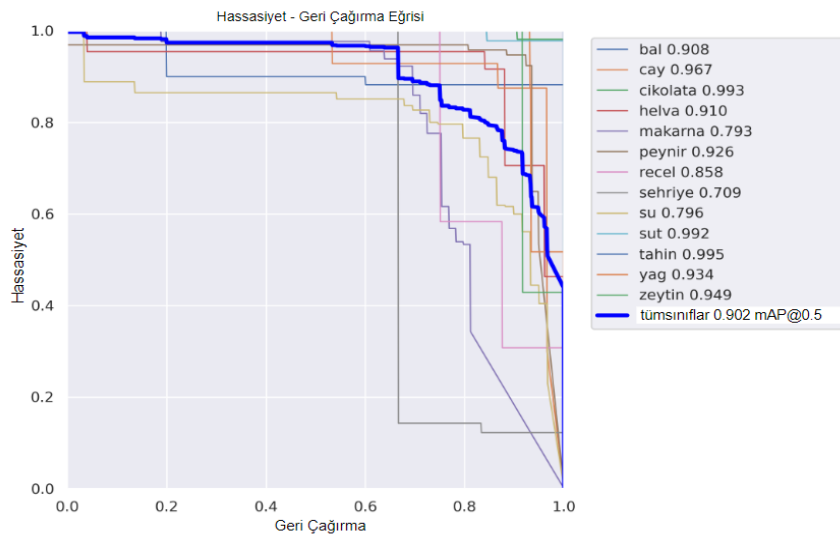
$$\text{Doğruluk} = \frac{DP + DN}{DP + DN + YP + YN} \quad (1)$$

4.3 Hassasiyet (Precision)

Hassasiyet, bir sınıflandırma modelinin pozitif olarak tahmin ettiği örneklerin, gerçek pozitiflere oranını ifade eden bir performans metriğidir. Hassasiyet, yanlış pozitifliği minimize etmeyi hedefler. Hassasiyet, Denklem 2'deki gibi hesaplanmaktadır:

$$\text{Hassasiyet} = (\text{Gerçek Pozitifler}) / (\text{Gerçek Pozitifler} + \text{Yanlış Pozitifler})$$

$$\text{Hassasiyet} = \frac{DP}{DP + YP} \quad (2)$$



Şekil 9. YOLOv8 eğitim modelinden elde edilen hassasiyet-güven eğrileri (Kategoriler bazında)

Önerilen bu çalışmada eğitim modelinden elde edilen hassasiyet ve geri çağırma eğrisi Şekil 9'da verilmektedir. Verilen hassasiyet-geri çağırma eğrisi altındaki alan (AUC), modelin performansını değerlendirmek için kullanılan bir ölçüttür. Bu alan ne kadar büyükse, modelin hassasiyet ve geri çağırma dengesine göre performansı o kadar iyi kabul edilmektedir. Burada bahsedilen eğri altında kalan alanın genişliği, modelimizin doğruluğunun yüksek olduğunu göstermektedir.

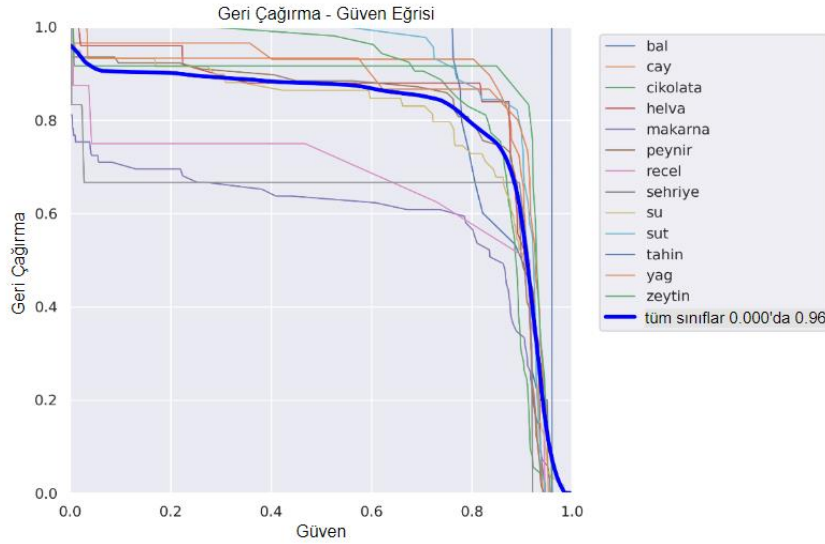
4.4 Duyarlılık (Recall)

Duyarlılık, bir sınıflandırma modelinin gerçek pozitiflerin ne kadarını doğru bir şekilde tespit ettiğini ifade eden bir performans metriğidir. Duyarlılık ile yanlış negatifleri minimize etme hedeflemektedir. Duyarlılık metriği, Denklem 3'teki gibi hesaplanmaktadır:

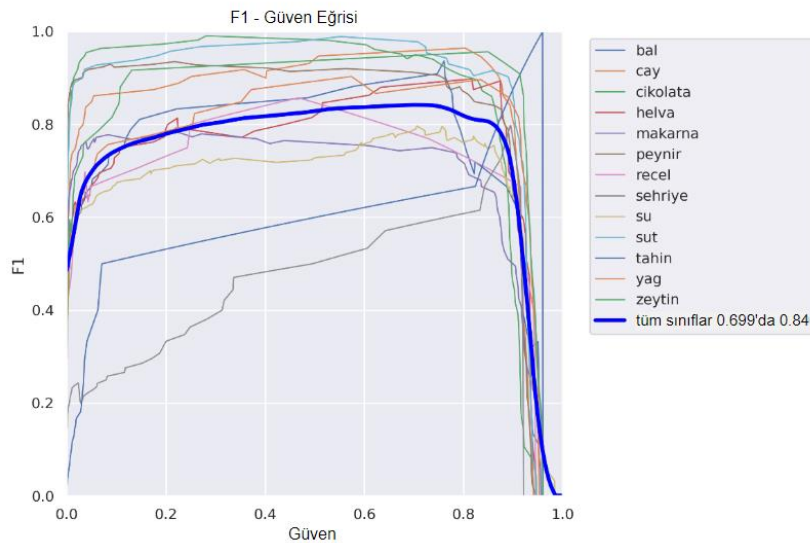
Duyarlılık = (Doğru Pozitifler) / (Doğru Pozitifler + Yanlış Negatifler)

$$Duyarlılık = \frac{DP}{DP + YN} \quad (3)$$

Önerilen çalışmada eğitim modelinden elde edilen duyarlılık ve güven eğrisi görüntüsü Şekil 10'da verilmektedir. Şekil 10'da elde edilen grafikte yüksek duyarlılıkla yanlış pozitiflerin en aza indirildiği, yüksek hassasiyetle de doğru tahminlerin ne kadar yüksek olduğunu göstermektedir. İki taraftan da eğrinin 1 değerine yaklaşması ve eğri altında kalan alan modelin doğruluğunun yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 10. YOLOv8 eğitim modelinden elde edilen duyarlılık ve güven eğrisi



Şekil 11. YOLOv8 eğitim modelinden elde edilen F1 skor ve güven eğrisi

4.5 F1 Skor

F1 skoru bir sınıflandırma modelinin performansını ölçmek için kullanılan bir metrik olup, hassasiyet ile duyarlılık değerlerinin birleşimini temsil etmektedir. F1 skoru, **Denklem 4'** teki gibi hesaplanmaktadır.

F1 Skor = $2 * (\text{Hassasiyet} * \text{Duyarlılık}) / (\text{Hassasiyet} + \text{Duyarlılık})$

$$F1 \text{ Skor} = \frac{2DP}{2DP + YP + YN} \quad (4)$$

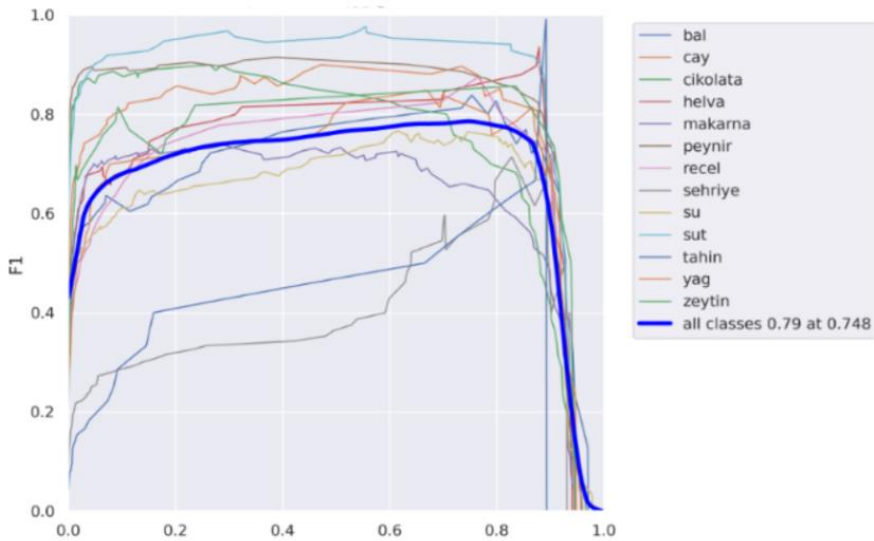
Bu çalışmada eğitim fazında elde edilen F1 skor ve güven eğrisi **Şekil 11'** de verilmektedir. Elde edilen grafik incelendiğinde, modelin performansının harmonik ortalamaya (hassasiyet ve geri çağırma değerlerinin ekstrem durumlarını da içerecek şekilde hesaplanan bir ortalama türü) dayalı olarak değerlendirilmesi, seçilen modelin mutlak anlamda en iyi model olmamakla birlikte, incelenen diğer modellere kıyasla tercih edilebilir bir seçenek olduğunu göstermektedir. Mevcut analizler çerçevesinde YOLOv8 modeli, karşılaştırıldığı diğer modellerden daha yüksek oranda metrikler elde etmiştir.

5 Tartışmalar

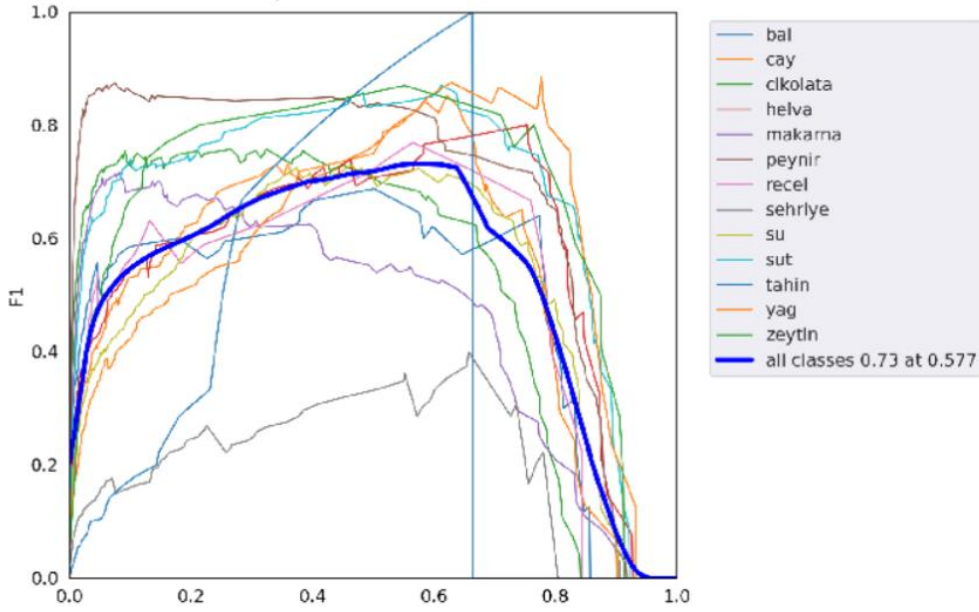
Bu çalışmada, market raflarındaki ürünlerin tanımlanması için YOLOv8, YOLOv5 ve EfficientDet D7TF2 nesne tespiti modelleri kullanılmıştır. İlk olarak EfficientDet D7 modeli üzerinde çalışılmış ve **Şekil 12'** de görüldüğü üzere F1 skoru ortalama olarak %79 civarında bulunmuştur. Güven düzeyi ise genellikle F1 skoruna yakın bir seviyede seyretmiştir. Ancak, belirli testlerde modelin istenilen performansı göstermediği ve güven düzeyinin

düşük olduğu gözlenmiştir. Bu durum, modelin belirli koşullarda güvenilir olmayabileceğini ve performansının değişkenlik gösterebileceğini işaret etmektedir. Elde edilen sonuçlar, EfficientDet D7 modelinin genel performansını ölçmek için bir referans noktası sağlamıştır. Ancak, modelin belirli durumlarda güvenilir olmadığı ve daha fazla iyileştirme gerektirebileceği göz önünde bulundurularak YOLOv5 modeli üzerinde çalışılmıştır. **Şekil 13'** te kategorize edilmiş ürünlerin çoğunun ortalamasının üzerinde performans gösterdiği, ancak bir kısmının ise ortalamasının altında kaldığı görülmektedir. Bu durum, modelin bazı alanlarda yeterli performansı sergileyemediğini ve geliştirilmesi gerektiğini işaret etmektedir. Modelin daha iyi sonuçlar elde etmesi için, farklı adım ve pencere sayıları gibi değişkenlerle tekrar çalıştırılması veya geliştirilmesi gerekmektedir. Ancak modelin denemesi sırasında adımların 50'nin katları üzerinden değiştirilmesiyle elde edilen en yüksek F1 skoru da bu tabloda görülmüştür.

YOLOv5 modelinin F1 skoru ortalama olarak %73 civarındadır ve güven düzeyi genellikle F1 skoruna yakın bir seviyededir. Ancak, belirli testlerde modelin beklenen performansı göstermediği ve güven düzeyinin düşük olduğu gözlenmiştir. Bu sonuçlar, modelin güvenilirliği ve performansı üzerinde daha fazla çalışma ve iyileştirme gerektirebileceğini vurgulamaktadır. Bu nedenle, modelin belirli durumlarda güvenilir olmadığını ve daha fazla geliştirme işlemi gerektiğini göstermektedir. **Tablo 3'** te elde edilen sonuçlar YOLOv5 modelinin genel performansını değerlendirmek için önemli bir referans noktası sağlamaktadır, ancak daha fazla çalışma ve iyileştirme gerektirebileceğini göstermektedir. Model performans metrikleri yeterli sonucu vermediğinden EfficientDet D7 ve YOLOv5 modelleri sonrasında YOLOv8 modeli kullanılmıştır.



Şekil 12. EfficientDet D7 eğitim modelinden elde edilen F1 skor ve güven eğrisi



Şekil 13. YOLOv5 eğitim modelinden elde edilen F1 skor ve güven eğrisi

Önerilen bu çalışma doğrultusunda deneysel sonuçlar bölümünde belirtildiği gibi en yüksek oranların YOLOv8 modelinde elde edildiği gözlemlenmiştir.

6 Sonuçlar

Bu çalışmada görme bozukluğuna sahip bireylerin hayatlarını kolaylaştırmak amacıyla market raflarında bulunan ürünlerin sınıflandırılmasında derin sinir ağları kullanılmıştır. Çalışma kapsamında YOLOv8, YOLOv5 ve EfficientDet D7 modelleri kullanılmış ve market veri seti üzerinde eğitilmiştir. Eğitim sürecinde önceden toplanan bir veri seti kullanılmış ve eğitim aşamasında elde edilen ağırlıklar kaydedilmiştir. Ardından test veri seti üzerinde performans değerlendirmesi yapılmış ve sınıflandırma sonuçları analiz edilmiştir. Performans metriği olarak hassasiyet, duyarlılık, F1 skor, mAp değerleri ölçülmüştür. Model eğitimi için 250 epoch sayısı ve 16 batch değeri kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda 8, 16, 32, 64 batch değerleri ve 50, 150, 250 adım değerleri karşılaştırıldığında modellerin 250 adımda en iyi performansı verdiği gözlemlenmiştir. Her üç modelin hassasiyet, duyarlılık, F1 skor ve mAp metrikleri karşılaştırıldığında EfficientDet D7TF2 modelinin diğer modellere göre en az %22.4 daha az doğruluk oranına sahip olduğu görülmüştür. Tüm metriklerde en yüksek performansı YOLOv8 modeli göstermiştir. Bu model üzerinde yapılan test sonucunda; doğruluk, hassasiyet, duyarlılık ve F1 skor oranları sırasıyla %92.75, %98.6, %95, %96.79 olarak hesaplanmıştır. Performansı en yüksek olan model olarak belirlendiği için mobil uygulama üzerinde yapılan eğitim için kullanılmak üzere YOLOv8 modeli TFLite'a çevrilmiştir.

Gelecek çalışmalarda ikinci faz olarak adlandırdığımız uygulama geliştirme fazının gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Ek olarak, veri setinin kategori bazlı genişletilmesi planlanmaktadır. Bu veri seti üzerinde

modelin eğitilerek geliştirilen mobil uygulama üzerinden görme bozukluğu olan bireyin anlık olarak cep telefonu kamerasını kullanması ile nesne sınıflandırılmasının sesli ve görsel olarak yapılması amaçlanmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından sağlanan 1139B412202533 nolu proje fonu tarafından desteklenmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlarda herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

- [1] İ. Çevik, H. Çakmak, Ö. Çelik ve P. Okyay, Yaşam boyu göz sağlığı: "2020 vizyonu: görme hakkı". ESTÜDAM Halk Sağlığı Dergisi, 6 (3), 310-321, 2021. <https://doi.org/10.35232/estudamhsd.891156>.
- [2] C. M. Elzean and E. M. Sakr, Proposed three-dimensional designs for the color wheel to help blind persons understand matching colors of their clothes. International Design Journal, 11 (2), 417-423, 2021. <https://dx.doi.org/10.21608/ijj.2021.153624>.
- [3] S. R. Flaxman et al., Global causes of blindness and distance vision impairment 1990–2020: a systematic review and meta-analysis. The Lancet Global Health, 5 (12), e1221-e1234, 2017. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(17\)30393-5](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(17)30393-5).
- [4] MedicalExpress, World's blind population to soar: study. <https://medicalxpress.com/news/2017-08-world-population-soar.html>, Accessed 10 Feb 2024.
- [5] B. S. Lin, C. C. Lee and P. Y. Chiang, Simple smartphone-based guiding system for visually

- impaired people. *Sensors*, 17 (6), 1371, 2017. <https://doi.org/10.3390/s17061371>.
- [6] M. Çakır, A. Çelik, İ. Özyalçın ve A. Uzun, Engelli insanlar için akıllı baston ve akıllı şapka tasarımı. 4th International Vocational Schools Symposium, pp. 1445-1454, Yalova, Turkey, 21-23 May 2015.
- [7] D. E. Gbenga, A. I. Shani and A. L. Adekunle, Smart walking stick for visually impaired people using ultrasonic sensors and Arduino. *International Journal of Engineering and Technology*, 9 (5), 3435-3447, 2017. <https://dx.doi.org/10.21817/ijet/2017/v9i5/170905302>.
- [8] B. Kaur and J. Bhattacharya, Scene perception system for visually impaired based on object detection and classification using multimodal deep convolutional neural network. *Journal of Electronic Imaging*, 28 (1), 013031-013031, 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1805.08798>.
- [9] C. Granquist, S. Y. Sun, S. R. Montezuma, T. M. Tran, R. Gage and G. E. Legge, Evaluation and comparison of artificial intelligence vision aids: Orcam myeye 1 and seeing ai. *Journal of Visual Impairment & Blindness*, 115 (4), 277-285, 2021. <https://doi.org/10.1177/0145482X211027492>.
- [10] K. Jolly, *Hands-On Data Visualization with Bokeh: Interactive Web Plotting for Python Using Bokeh*. Packt Publishing Ltd., 2018.
- [11] J. Sudol, O. Dialameh, C. Blanchard, T. Dorcey, LookTel—A comprehensive platform for computer-aided visual assistance. 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition-Workshops, pp. 73-80, San Francisco, CA, USA, 2010.
- [12] J. Bigham, VizWiz. Rochester Human Computer Interaction (ROC HCI). <http://itunes.apple.com/us/app/vizwiz/id439686043?mt=8>, Accessed 5 May 2024.
- [13] E. Biknevicius, Say Text Apps for blind and visually impaired people, <http://etaling.com/en/say-text-apps-for-blind-and-visually-impaired-people/>, Accessed 6 May 2024.
- [14] A. Khan, S. Khusro, B. Niazi, J. Ahmad, I. Alam and I. Khan, TetraMail: a usable email client for blind people, *Universal Access in the Information Society*, 19, 113-132, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10209-018-0633-5>.
- [15] A. Hoonlor, S. P. N. Ayudhya, S. Harnmetta, S. Kitpanon and K. Khlprasit, UCap: A crowdsourcing application for the visually impaired and blind persons on Android smartphone. 2015 International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC), pp. 1-6, Chiang Mai, Thailand, 2015.
- [16] D. Shukla and M. Shah, Smart trolley shopping for automatic billing & assistance for visually impaired, *J. Eng. Sci.*, 14 (04), 2023.
- [17] C. Kaufman-Scarborough and T. L. Childers, Understanding markets as online public places: Insights from consumers with visual impairments. *Journal of Public Policy & Marketing*, 28 (1), 16-28, 2009. <https://doi.org/10.1509/jppm.28.1.16>.
- [18] M. George and C. Floerkemeier, Recognizing products: A per-exemplar multi-label image classification approach. *Computer Vision—ECCV 2014, 13th European Conference*, pp. 440–455, Zurich, Switzerland, 2014.
- [19] S. Öncü, *Bilgisayarlı görü ve ses algılama tekniği ile hareketli nesne takibi*. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2014.
- [20] M. T. Ağdaş ve S. Gülşen, Güvenlik kameralarında otomatik silah ve bıçak tespit sistemi: karşılaştırmalı yolo modelleri. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (41), 16-22, 2022. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1163675>.
- [21] G. Tonguç, B. A. Balcı ve M. N. Arslan, Su ürünleri yetiştiriciliği için balık davranışlarının bilgisayarlı görüntü işleme yöntemleriyle izlenmesi, *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 7 (4), 568-581, 2022. <https://doi.org/10.35229/jaes.1197703>.
- [22] G. Jocher et al., *Ultralytics/yolov5: v7. 0-yolov5 sota realtime instance segmentation*, Zenodo, 2022.
- [23] J. Terven, D. M. Cordova-Esparza and J. A. Romero-Gonzalez, A comprehensive review of yolo architectures in computer vision: From yolov1 to yolov8 and yolo-nas. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 5 (4), 1680-1716, 2023. <https://doi.org/10.3390/make5040083>.
- [24] R. Munawar and G. Jocher, *Ultralytics*. <https://github.com/ultralytics/ultralytics>, Accessed 5 February 2024.
- [25] M. Tan, R. Pang, and Q. V. Le, Efficientdet: Scalable and efficient object detection. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 10781-10790, 2020.
- [26] A. Srikanth, A. Srinivasan, H. Indrajit and N. Venkateswaran, Contactless object identification algorithm for the visually impaired using efficientdet. *Sixth International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, pp. 417-420, Chennai, India, 2021.





Bir FTTH yapısını, OFSD kurgusu ile tasarlama Designing an FTTH structure with an OFSD setup

Turgay Karacan^{1,*} , Bekir Sami Tezekiçi² 

¹Yüzüncüyıl Mah. 85167 Sok. Nidapark Sitesi A Blok No:6 Kat:13/58, 01360, Adana, Türkiye

²Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Merkez Yerleşke, Bor Yolu Üzeri, 51240, Niğde, Türkiye

Öz

Bilgi teknolojilerinin gelişimi; bilgi toplama, işleme, depolama ve ileme süreçlerinde medeniyetimize büyük ilerlemeler sağlatmıştır. Yazının icadı ile başlayan bu süreç 20. yüzyılın ilk yarısında bilgisayarların icat edilmesiyle devrim niteliğinde gelişmelere sebep olmuştur. 1980'lerin sonlarında internetin doğuşu ve yaygınlaşması ile bilginin insanlar arasında yayılması çok kolaylaşmıştır. Bilgi teknolojileri sürekli olarak evrim geçirmekte ve yeni yeniliklerle daha da ileriye taşınmaktadır. Bu gelişmeler hem bireysel kullanıcıların hem de işletmelerin bilgiye erişim ve kullanım şeklini kökten değiştirmektedir. Her araştırma gibi bilimsel olarak başlamış ve şu an tüm dünyada haberleşmeyi sağlayan internet birçok sektörün oluşmasına zemin hazırlamış ve karşı konulmaz bir kudrete ulaşmıştır. Bu vaziyet, çok daha az masraf ile daha yüksek hızlı erişim hizmeti sunan, daha performanslı network yapılarının tesis edilmesi gerekliliğini oluşturmuştur. Sürekli talebi fazlalaşan internetin ücra yerlere hatasız ve hızlı olarak hizmet verilebilmesi, iyi tasarlanan fiber optik ağlar sayesinde olmaktadır. FTTH (Fiber to the Home), yüksek hızlı internet erişimi sağlamak için fiber optik kabloların doğrudan kullanıcıların evlerine kadar getirildiği bir teknolojidir. Bu teknoloji, geleneksel bakır kablolarla karşılaştırıldığında çok daha yüksek hızlar ve daha güvenilir bağlantılar sunar. İlgili çalışmada, haneye kadar fiber (FTTH) mimarisinden bahsedilmiş, örnek bir fiber internet abonesi incelenmiş ve santralden eve kadar fiber kablonun, OFSD (Optik Fiber Saha Dolabı) ve optik bölücülerin en uygun nasıl konumlandırılacağı açıklanmış, Niğde ilinde yapılan uygulaması ile desteklenmiştir.

Anahtar kelimeler: Gpon, FTTH, İnternet

1 Giriş

Özellikle son on yılda, hem son kullanıcı tarafında taleplerin artması hem de içerik üreticileri tarafından daha kaliteli çözünürlükte içerikler (veri, video, oyun vb.) üretilmesinin sonucu olarak bakır şebekelerin bu kapasiteleri taşıyamaması, optik kabloya olan ihtiyacın önemini artırmış Neden FTTH'e geçmeliyiz sorusunun da cevabı olmuştur. Fiber optik kablo teknolojisi, son kullanıcı tarafından gelen dar bant ve geniş bant servis taleplerini kaliteli, hızlı, etkili ve güvenli bir şekilde iletim ortamı sunmaktadır.

Abstract

Development of information technologies; It has brought great progress to our civilization in the processes of collecting, processing, storing and transmitting information. This process, which started with the invention of writing, led to revolutionary developments with the invention of computers in the first half of the 20th century. With the birth and widespread use of the Internet in the late 1980s, it became much easier to spread information among people. Information technologies are constantly evolving and being moved forward with new innovations. These developments radically change the way both individual users and businesses access and use information. The internet, which started scientifically like every research, and which now provides communication all over the world, has paved the way for the formation of many sectors and has become an irresistible power. This situation has created the necessity of establishing higher-performance network structures that provide higher speed access service at much less cost. The ability to provide error-free and fast internet service to remote areas, with ever-increasing demand, is possible thanks to well-designed fiber optic networks. FTTH (Fiber to the Home) is a technology in which fiber optic cables are brought directly to users' homes to provide high-speed internet access. This technology offers much faster speeds and more reliable connections compared to traditional copper cables. Purpose of this study is to tell about the fiber to the home (FTTH) architecture, to examine a sample fiber internet subscriber, and to explain how to position the fiber cable, OFSD and optical splitters from the switchboard to the house most appropriately, and supported by the application made in Niğde.

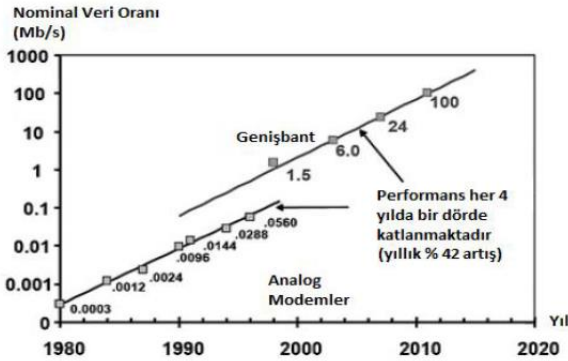
Keywords: Gpon, FTTH, İnternet

Çoğunlukla hali hazırdaki bakır ağların yerini almaya başlayan fiber optik haberleşme networkünde, yakın zamanda fiber optik cihazların direkt olarak hanelerdeki müşterilere eriştiği teçhizatlar olması istenmektedir. Bu teçhizatlar en bilinen şekliyle doğrudan eve kadar fiber sistemler (FTTH) olarak adlandırılır.

Paul Shumate [1] isimli araştırmacı tarafından, 2008 yılında Journal Of Lightwave Technology (Işık Dalgası Teknolojisi Dergisi) isimli dergide yayımlanan makalede, FTTH mimarisi ilk defa 1977 yılında video tabanlı haberleşme amaçlı Japonya'da kullanıldığını belirtmiştir.

Avrupa'da ilk FTTH denemeleri ise 1980'li yılların başından itibaren görülmeye başlanmıştır. Türkiye'de FTTH altyapısı 2000'li yılların başlarında görülmeye başlanmıştır. 2008 yılında ise sabit hat operatörü Türk Telekomünikasyon A.Ş., GPON (Gigabit Passive Optic Network) ve Aktif Ethernet mimarilerini kullanarak FTTH projeleri üzerinde çalışmaya başlamıştır. 2011 yılının başında İstanbul'da ilk GPON müşterileri çevrimiçi olarak bağlanıyordu. Aynı zamanda İzmir, Diyarbakır ve Ankara'da İstanbul'dakileri takip eden birkaç GPON projesi vardı [2]. 2020'li yılların başlaması ve pandemi ile birlikte başlayan süreçte, internet trafiğinin çok hızlı artışından dolayı tüm Türkiye'de daha sık görülmeye başlanmıştır.

İlerleyen zamanlarda ONT (Optical Network Terminal) ve Modem gibi teçhizatlar, her hanede müşteriye özel olacağı ve FTTH mimarisinin her metropol ve kırsalda aktif edileceği bilinmektedir. Fakat bulunduğumuz zamanda parasal sebeplerden ötürü her haneye optik cihaz kurmak yerine apartmanlara veya sokak kabinlerine aktif cihazlar kurularak birden fazla kullanıcıya tek erişim noktasından Ethernet veya VDSL (Very High-bit-rate Digital Subscriber Line, Çok Yüksek Aktarım Hızına Sahip Sayısal Abone Hattı) yapısı ile dağıtılarak hizmet verilmesi tercih edilmektedir [3]. Bu süreç başlangıçta FTTC (Fiber to The Curb) ağ sistemleri ile başlamış olup zamanla bazı binaların özel durumlarından dolayı daha düşük kullanıcı kapasiteli FTTB (Fiber to The Building) sistemleri de tercih edilmiştir.



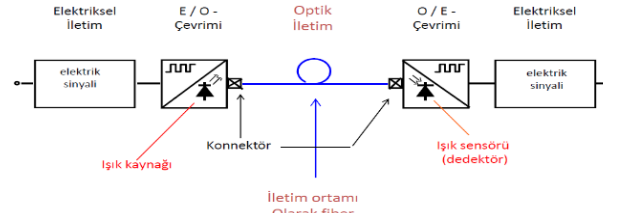
Şekil 1. Yıllara göre erişim ağlarında bant genişliği ihtiyacının değişimi [4].

FTTH mimarisi tasarlanırken her ne kadar sistem tarafı önemli bir kısım teşkil etse de kullanıcıya sinyal iletilirken fiberin konumlandırılması, bölücülerin nerede ve hangi katsayı ile kullanılacağı da sistem kadar önemlidir. Çünkü OLT (Optical Line Terminal) tarafından oluşturulan sinyali güçlü bir şekilde ONT'ye ulaştırmak yüksek hızlarda kullanıcıya daha verimli internet hizmeti sunacağı gibi katma değerli IPTV (Internet Protocol Television), VOD (video-on-demand), VOIP (Voice over ip) ...vb gibi servislerin de kesintisiz çalışmasını sağlayacaktır.

Bu makalede eve kadar fiber mimarisinde fiber kablo ve bölücülerin metropol şehirlerde nasıl daha verimli yerleştirileceğinden bahsedilmiş, Niğde ilinde uygulaması yapılmıştır.

2 Materyal ve metot

Fiber optik kablunun hızlı bir şekilde iletim sağlaması içerisindeki camdan yapılmış kısımda ışığın yansarak ilerlemesi sayesinde olmaktadır. Aktif yani elektrik ile çalışan cihazların portlarına gelen elektrik sinyali optik sinyale dönüştürülüp, fiber kabloya bağlanarak karşı uca çok hızlı bir şekilde iletilip alıcıda tekrar elektrik sinyaline çevrilmekte ve veri bu şekilde uçlar arasında iletilip, işlenmektedir.



Şekil 2. Optik iletim diyagramı.

Taşıyıcı frekansın diğer sistemlerden çok yüksek olması, daha yüksek bant genişliklerine ve iletim hızlarına erişmesi fiber erişimin üstün olduğunu göstermektedir. Ayrıca şu anki teknoloji, ITU.T (Uluslararası Telekomünikasyon Birliği, Telekomünikasyon Standardizasyon Sektörü) G653.B standartına göre; single mode bir fiber ile 1550 nm dalga boyunda 75-100 km üstü mesafelerde sorunsuz olarak yüksek hızlarda iletişimi sağlanabilir. Bununla birlikte maliyet açısından fiber optik sistemlerin taşıma, depolama, tesis ve montajı, bakır sistemlere nazaran optik sistemlerin yapısal özellikleri nedeniyle daha ucuzdur. Fiber kablolar daha az saklama alanı gerektirir ve daha hafiftir. Daha küçük hacim ve daha az ağırlık doğrudan taşıma ve depolama maliyetlerini azaltan unsurlardır. Ayrıca fiber optik sistemin uzun vadeli maliyetinin, metalik bir sistemin uzun vadeli maliyetinden daha az olacağı düşünülmektedir [5]. Fiber optik kablodan bilgi sızdırmak için kablo kesilerek fiber ek cihazı yardımıyla farklı bir sisteme bağlanması gerekir. Böyle bir durumda veri akışı duracağından ve ek sonrası zayıflama oluşacağından sorunun tespiti çok hızlı olacaktır.

Cam ya da plastik fiberler elektrik akımından etkilenmediği için manyetik alandan bağımsız iletim yapabilir. Örnek olarak enerji nakil hatlarındaki yüksek gerilime sahip kablolar ile haberleşme amaçlı fiber optik kablolar birlikte oldukları halde optik kablodan taşınan sinyalde bozulma olmamaktadır. Ayrıca dışardan bir ışık kaynağının fiber optik kabloya girme olanağı yoktur. Bu sayede 144 tane fiber kılı içeren bir kabloda bile sinyaller karışmamaktadır. Optik sistemlerde kullanılan ışınlar sistemin dışına sinyal yaymazlar. Dolayısıyla fiber optikler diğer sistemlerde olmayan yüksek derecede sinyal güvenliği sağlar. İletimin çalınması çok zordur. Fiber optiklerde dışardan yapılacak müdahalelerle sistemden optik enerji çekmeden sinyal elde etmek mümkün değildir. Dolayısıyla sistemden bilgi elde etmek için girişilen teşebbüsler optik enerji seviyesindeki değişimler sayesinde kolaylıkla tespit edilebilir. Bu konu özellikle yüksek düzeyde güvenilirlik gerektiren askeri haberleşme alanında son derece hayati bir konudur [5].

Yalıtkan malzemelerden yapılmış olması sonucu birçok farklı teknolojiye kullanım imkânı sağlamaktadır. Kırılma ya da kopması durumunda ise kıvılcım çıkarmaması ve +500 °C ısıya kadar ısıya dayanıklı olması yangın riski bulunan ve patlayıcı maddelerin bulunduğu ortamlarda bile güvenliğe kullanılmasını sağlamaktadır. Ayrıca bakır kabloya oranla çok hafiftirler. Optik fiberler insan saçından daha ince ölçülerde bile üretilebilirler. Küçük boyut ve düşük ağırlıkları bu sistemi vazgeçilmez bir unsur haline getirmiştir. Örneğin bir uçakta klasik bakır kablolar yerine fiber optik kablolar kullanılarak toplam ağırlıktan 200kg.'a kadar tasarruf edilebilmektedir. Bu özelliğiyle fiber optik kablolar ağırlığın önemli bir kısıtlama olduğu askeri sistemlerin (uçak, helikopter, gemi, tank gibi) performansını olumlu yönde artırmaktadır. Ayrıca diğer kablolarla oranla çok küçük boyutlarda olmaları söz konusu sistemlerin boyutlarını da aynı oranda küçültmekte ve daha büyük hedefler olmasını engellemektedir [5].

Tablo 1. Fiber ve Bakır kablo ağırlıklarının karşılaştırılması [2].

Fiber Damar	Bakır İletken
30-50 gr/km	(0.6 mm ² Ø) 3 kg/km.

İSS (İnternet Servis Sağlayıcısı)'ler işletme ve yatırım maliyeti yüksek olan bakır kabloları bir anda alt yapılarından kaldırmak yerine son kullanıcıya yaklaşma yolunu izleyerek, bunu zamana yayma politikası gütmüşlerdir. Bunun sonucu olarak hayatımızda FTT(X) terimi gelişmiş ve bu terimin alt kolları olarak FTTB, FTTC, FTTH, FTTN, FTTP gibi birçok terim türemiştir. Bu terimler, B "Building" (Bina), H "Home" (Ev), C "Cabinet" (Saha Dolabı) ve N "Node" (Ağ), P ise "Premises" (Tesisler)'i ifade eder.

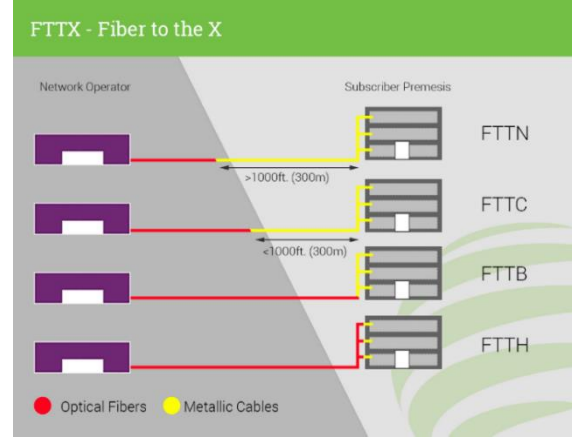
FTTH 'te aktif bir cihaz tesis edilmeyip, son kullanıcıya kadar fiber optik kablo ile gidilir. Bu sayede yüksek hızlara ulaşmak mümkündür.

FTTB yapıda bina içerisinde çalışan bir yapı olup, sistem odası ya da elektrik odasında toplanan zayıf akım kablolarına yakın bir yere tesis edilir. Aktif bir cihaz kullanılıp bakırdan gelen kullanıcı taleplerini fiber üzerinden yönlendiricilere taşır.

FTTC dış mekân çalışan bir yapıda tesis edilir. Klasik bakır saha dolabının üzerine giydirmeye ya da yeni olarak tesis edilen tipleri olup aktif sistemlere kadar fiber çekilerek kurulan bir yapıdır. Kullanıcıların fiber'e olan uzaklığı FTTB'ye göre yüksektir. Bakır uzunluğunu fazla olması sinyalde zayıflamaya neden olmakla birlikte yüksek hızlarda problem yaşanabilir.

FTTN, FTTC yöntemi ile bire bir örtüşmekte olup, FTTC'ye göre, son kullanıcıya olan bakır kablo uzunluğunun 300m' den daha uzun olması ve kabin içerisindeki aktif cihazın çok daha fazla abone kapasitesine sahip olması belirgin farklarındandır [2].

FTTP, FTTH ile aynı olup birbirinin yerine kullanılan iki terim olarak kabul edebiliriz. Tek fark olarak FTTH dikey şehir mimarisinde, FTTP ise yatay şehir mimarisinde tercih edilir.



Şekil 3. FTTX karşılaştırması [6].

2.1 FTTH mimari yapısı

FTTH yapısını anlayabilmek için öncelikle PON (Passive Optic Network) yapısından bahsetmek gerekir. Bu yapının en önemli özelliği tek bir noktadan çok noktaya veri alışverişi yapmasıdır. OLT cihazları üzerinde bulunan PON portlarından çıkan sinyalleri OFSD'ler aracılığıyla binalara erişmesi ve optik bölücülerden çoğullaşıp dairelere kadar fiber bir yapıyla gitmek bu yapının en güncel ve en verimli halidir. Burada OLT santral binalarında bulunan aktif bir cihazdır ve bu cihaz üzerinde yüzlerce PON portu oluşturulabilir. Bu üretici firmanın OLT üzerinde kullanacağı kart tiplerine göre değişiklik gösterebilir.

FTTH yapısının kolay işletilebilir olmasını sağlayan en güzel yöntem ise OFSD'lerdir. Bu kabin'ler santral içerisindeki optik dağıtım çatılarının dış mekânda yeniden tasarlanmasıdır. Bakır ağ yapısında kullanılan saha dolaplarına göre çok hafif ve maliyetleri çok düşüktür. Santralden çıkarak gelen fiber kablo burada sonlandırılıp, sonrasında bir fiber patch (yarma) kablo sayesinde atlama yapılarak hangi bina 'ya internet hizmeti götürülmek isteniyorsa o binaya ait kablo ile kapıştırılarak sinyalin devamlılığı sağlanmış olur. Binaların zayıf akım panolarının bulunduğu, genellikle elektrik odası olarak belirlenmiş alanlarda fiber sonlandırılması yapılır. OFSD'lerden binalara fiber çekilirken eğer bir siteye gidilmiyorsa genellikle küçük hacimli içerisinde altı adet fiber damarı bulunan kablolar tercih edilir. Çünkü birçok binada maksimum iki adet fiber damarı o binaya alt yapı hizmeti götürmek için yeterli olacaktır. Diğer damarlar ise yedeklik amaçlı olacaktır.

Bu kısımdan sonra optik bölücüler, tek bir fiber damarı istendiği takdirde 2 ve katları olacak şekilde maksimum 64 kanala ayırır. İstenilen bir kanaldan daire içine kadar tesis edilen fiber patch kablolar kullanılarak FTTH olarak belirtilen eve kadar fiber tesis edilmiş olur. Optik bölücülerden geçen sinyal zayıflamaya uğrayacaktır. Bölme oranına göre zayıflama değerleri Tablo 2'de belirtilmiştir. Cadde'nin nüfus yoğunluğuna göre istenilirse OFSD'lerin içinde de optik bölücüler kullanılabilir. Bu kısımda 128 daire sayısına ulaşılacak şekilde plan yapılmalıdır. Çünkü OLT üretici firmalar bir PON portuna maksimum 128 adet ONU (Optical Network Unit) gelecek şekilde tasarlanışlardır.

Tablo 2. Optik bölücülerdeki bölünme oranına göre kayıp değerleri.

Bölme Oranı	Bölücü Kaybı
1/2	3.01
1/4	6.02
1/8	9.03
1/16	12.04
1/32	15.05
1/64	18.06

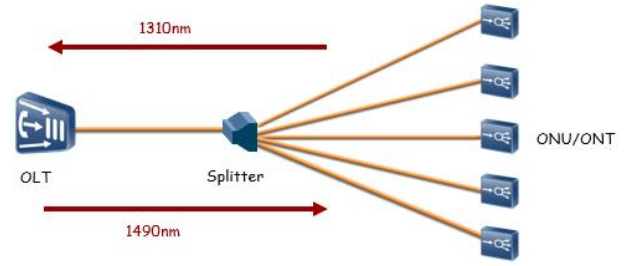
2.1.1 PON sistemlerinde ağ tasarımı

PON sistemlerinde ağ tasarımı yapılırken en çok dikkat edilmesi gereken husus optik gücü, son kullanıcıda bulunan ONT'lere (Optik Network Terminal) en verimli şekilde ulaştırmaktır. ONT cihazları belirli bir sinyal aralığında çalışmaktadır ve düşük sinyal kendisine ulaştığı takdirde düşük internet hızı ya da hatta kopmalar gibi sorunlar oluşturacaktır. Ayrıca bu tasarım yapılırken optik bölücüler en çok sinyal kaybına sebep olacağından bölücü oranları titizlikle seçilmelidir. Diğer bir zayıflama unsuru ise sinyalin optik kablo üzerinde ilerlerken uğrayacağı zayıflamadır. Bu değer km başına 0.35dBm'dir.

Bir PON mimarisinde OLT ile ONT arası maksimum 20km olmalıdır. OLT'de bulunan PON portlarının çıkış seviyesi +3 ile +4dB arasındadır. ONT tarafında -28dBm değerine dikkat edilmesi gerekir. Bu değerden daha düşük sinyallerde problem oluşacaktır. Bahsedilen sinyal değerleri, Türk Telekom alt yapısı ile tasarlanmış PON ağ yapısında çalışan hizmetler üzerinde edinilen deneyimler sonucunda ortaya konmuştur.

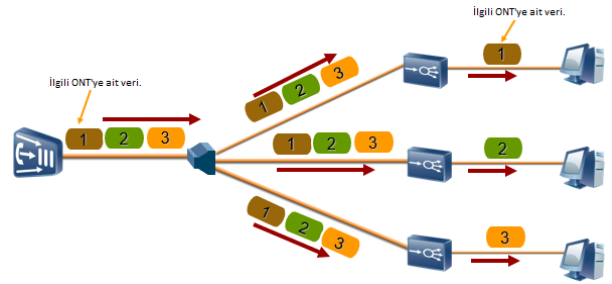
2.1.2 Basit GPON prensibi ve veri çoğullama yöntemi

GPON Wavelength Division Multiplexing (WDM: Dalga boyu bölmeli çoğullama) teknolojisini kullanmaktadır ve tek bir fiber kılı üzerinden çift yönlü iletişim sağlamaktadır. Upstream/Downstream (Yukarı akış/Aşağı akış) sinyallerini birden fazla müşteri için tek kıl üzerinden ayırabilen GPON teknolojisi 2 adet mekanizma kullanmaktadır. İlki DS(Downstream: İndirme) yönünde data paketleri için broadcast yöntemini, diğeri ise US(Upstream: Yükleme) yönünde data paketleri için TDMA(Time Division Multiplex Access : Zaman Bölmeli Çoklama Erişimi) kullanmaktadır. GPON, 1.25 Gbit/sn (upload) yükleme hızını ve 2.5 Gbit/sn (download) indirme erişim hızını destekler [7]. Ayrıca maksimum 20 km fiziksel erişim olanağı sunmakla beraber ve 60 km maksimum mantıksal erişim denilen tek yönlü ultra uzun iletimi destekler [8]. Bu da gösteriyor ki yakın zamanda çok uzak mesafelere santral kurmadan sadece fiber optik kablo ile pasif bir şekilde geniş bant hizmeti verilebilecektir. Aynı zamanda GPON, 1:64'e kadar genişletilebilen optik bölücüye sahiptir ve GPON'un çok sayıda kullanıcıyı desteklemesini ve geniş bir alanı kapsamasını sağlayan nadir kullanılan 1:128 bölme oranını da desteklemektedir [2].

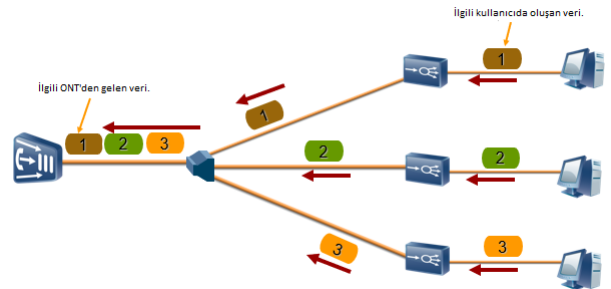


Şekil 4. Basit GPON çalışma prensibi [6].

GPON ağında, OLT, optik ayırıcıya tek bir optik fiber aracılığıyla bağlanır ve ardından optik ayırıcıdan çıkan kablolar ONT'lere bağlanır. Veri iletimi için yukarı ve aşağı yönlerde farklı dalga boyları benimsenmiştir. Yukarı akış (Upload) dalga boyu 1310 nm ve aşağı akış (Download) dalga boyu 1490 nm'dir. Download yönünde, tüm veriler OLT'den tüm ONT'lere broadcast denilen yapıyla yayınlanır. ONT'ler daha sonra ilgili verilerini seçip alır ve diğer verileri atarlar. Doğru bilginin doğru ONT'ye ulaşması GEM (GPON Encapsulation Mode : GPON kapsülleme modu) protokolü denilen ve OLT tarafından her bir ONT'ye atanan tek port numaralarıyla sağlanmaktadır. Bu şekilde kullanıcıların yaptıkları istemler farklı kullanıcılara gitmemiş olur.



Şekil 5. Download yönünde GPON çalışma prensibi [6].

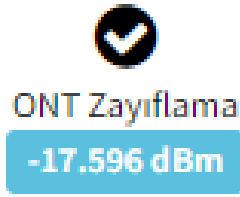


Şekil 6. Upload yönünde GPON çalışma prensibi [6].

Upload yönünde, her ONT, OLT'ye yalnızca OLT tarafından izin verilen ve tahsis edilen zaman diliminde veri gönderebilir. Bu, her ONT'nin belirli bir sırayla ve farklı zaman dilimlerinde veri göndermesini sağlar, böylece veri çakışmaları önlenmiş olur.

2.1.3 Bir Fiber internet abonesinin incelenmesi

Bu kısımda bir fiber internet abonesi incelenmiştir. İlgili müşteri hızı 500Mb olup santrale yani OLT'ye olan mesafesi yaklaşık 1,5km'dir. OLT çıkış portundan sonra 1x2 optik bölücüye girip binaya kadar fiber kablo ile gelerek bina içerisinde 1x32 optik bölücüye girmiştir. OLT port çıkış sinyali gücü +3 ile +4 dBm olduğunu hesap edersek, bu sinyal gücünün 1x2 optik bölücüde 3,01dBm, 1x32 optik bölücüde ise 15,05dBm zayıflamaya uğraması gerekmektedir. Toplamda sadece splitter kaybı 18,06 dBm olan sinyal, optik dağıtım çatısı ve u-link geçişleri sırasındaki kayıpları da hesap edecek olursak yaklaşık 3-4 dBm arasında bir kayba daha uğrayarak ONT cihazına 17.596 dBm gücüyle ulaşmaktadır.

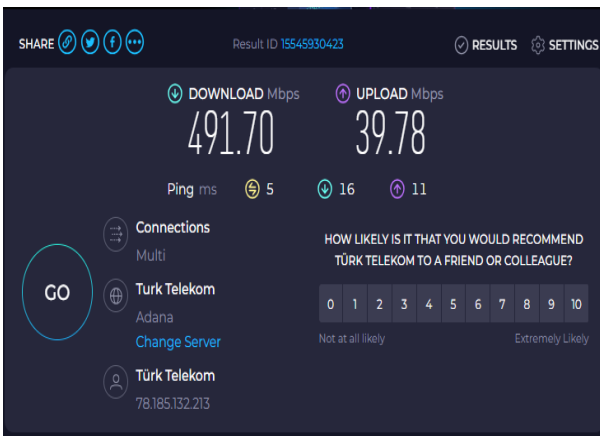


Şekil 7. ONT cihazına ulaşan sinyal değeri [9].

OLT üretici firmalar ONT'ye ulaşan sinyalin -28 dBm ve üzerinde olmasının hat kalitesi açısından sağlıklı olmayacağı ve internet hızında düşmeler yaşanabileceğini belirtmektedirler [10]. Bu değer göz önünde bulundurulduğunda ise -17.596 dBm değeri bu abone için çok iyi bir değer olup, tarife hızına rahatlıkla ulaşabileceği düşünülmektedir. Ayrıca müşteriye tahsis edilen download ve upload bilgileri şu şekildedir.

Tablo 3. Müşteriye tahsis edilen download ve upload band genişlikleri [9].

Servis Konfigurasyon Bilgileri	
Servis Durumu	Aktif
Download Hızı	512000 kbps
Upload Hızı	40960 kbps



Şekil 8. 500Mb hızında bir internet müşterisinden alınan download ve upload hız testi değerleri.

Tablodan da görüleceği üzere download yönünde müşteriye 512000kb hızında, upload yönünde ise 40960kb hızında band genişliği tahsis edilmiştir. Hat kalitesinin iyi olması ve kayıpların istenilen seviyede olması sonucu ilgili müşteriye yapılan hız testi sonucu Şekil 8'de de görüleceği üzere bu durumu özetlemektedir.

2.1.4 Niğde ilinde tasarlanmış FTTH altyapı planı

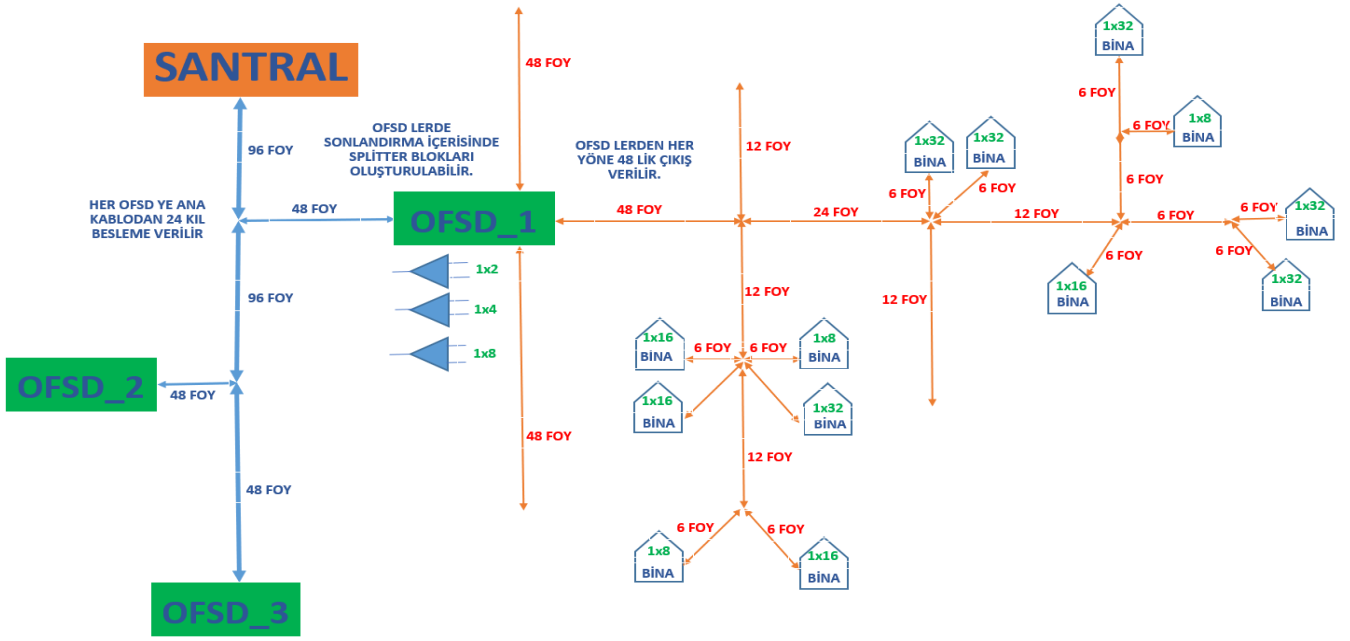
Şekil 9'da belirtildiği üzere, santralden yüksek kapasiteli çıkan fiber kablolar önce OFSD'lere sonlandırılmıştır. Niğde ili için her OFSD'ye 24 adet fiber damarının bırakılması uygun görülür, bir sonraki OFSD'ye 48 fiber damarlı kabloyla devam edilmiştir. OFSD'lerde optik bölücülere giren damarlar çoğullaşmış mahalle aralarına kadar uzanan fiberlerle kapıştırılarak binalara ulaşılmaya çalışılmıştır.

OFSD'lerden binalara fiber çekilirken eğer bir siteye gidilmiyorsa genellikle küçük hacimli içerisinde 6 adet fiber damarı bulunan kablolar tercih edilir. Çünkü birçok binada maksimum 2 adet fiber damarı o binaya alt yapı hizmeti götürmek için yeterli olacaktır. Diğer damar ise yedeklik amaçlı olacaktır. Bu şekilde yapılacak bir tasarımın hem fiber kablo hem de OLT portlarının kullanımı açısından çok verimli olacaktır.

Bu yapıda dikkat edilecek diğer bir unsur ise OFSD'lere 1x8'den daha büyük kapasiteli optik bölücünün olmamasıdır. Aksi takdirde OFSD içerisinde çok fazla kablo kalabalığı olacak bu da işletmeyi zor hale getirecektir. Ayrıca OFSD genişliğinin 24U büyüklüğünde olduğu göz önüne alındığında çok fazla sonlandırma çekmecesi montajı yapılamayacaktır. Bu durum OFSD'lerin müşteri ile direkt irtibatlandığı değil sadece çoğullanarak binalara giden kabloları yön verilen bir yer sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Bu yüzden şehir içerisindeki dikey mimaride 1x8 ve altındaki optik bölücüler OFSD'ler için en uygundur.

GPON teknolojisinde OLT'den maksimum 20km uzalıktaki bir aboneye sorunsuz veri iletimi sağlanabilir. Fakat bazı operatörler bunu 10km ile sınırlı kılabiliyorlar. Gelecekte çok yüksek hızlı internet hızlarına geçiş olduğu düşünülecek olursa, müşteri tarafında sorun yaşamamak adına bu tür kararı almış olabilirler.

OLT'den ONT'ye sinyal iletimi sırasında oluşan kayıplara fiber optik kablo iç zayıflaması, fiber ek noktaları ve optik bölücüler sebep olmaktadır. Fiber optik kablonun uzunluğuna bağlı olarak her kilometrede 0.25 dBm kayıp meydana gelir. İlave olarak şebekede kullanılan F/O kablolar 2 km'lik makaralara sarılıdır. Bu durum her 2 km mesafede bir olmak üzere kablolar arasında ek yapılması gerektirmektedir. Böylece her bir fiber ekinin bulunduğu noktada 0.05 dB değerinde zayıflama meydana gelmiş olur. Ayrıca santral, OFSD ve bina'da olmak üzere 3 ara geçiş (patch cord) noktalarında 1dBm kayıp oluşmaktadır. Bunun haricinde OFSD ve bina'da bulunan optik bölücüler ayrıca bir zayıflama daha oluşturmaktadır. Şekil 9'daki yapıya bakıldığında 10km'lik maksimum mesafede sinyalin yeterince zayıfladığı ve bundan sonraki mesafelerde artık sinyalin iletilmemeye riskine girdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 9 Niğde ilinde tasarlanmış PON portu üzerinden FTTH ağ tasarımı. (FOY, Fiber Optik Yeraltı)

- Santral içerisinde ODF – OLT bağlantısı için patchcord geçişi için 1dBm,
- 10km fiber mesafesinde $0,25 \times 10 = 2,5$ dBm. Bu mesafe OLT-OFSD, OFSD-Abone olacak şekilde her iki alandaki mesafe dahil edilmiştir.
- OFSD içerisinde sonlandırma çatısından optik bölücüye, optik bölücüden müşteri yönüne giden çatıya patchcord geçişleri için 2dBm zayıflama olacaktır.
- Ayrıca OFSD içerisinde 1x4 optik bölücü kullanırsak 6,02dBm'lik bir zayıflama daha oluşacaktır.
- Bina içerisinde 1x32'lik optik bölücü kullanırsak 15,05dBm'lik zayıflama oluşacaktır.
- Ayrıca bina içerisinde sonlandırma ve optik çatı arasındaki geçişte 1dBm'lik zayıflama oluşacaktır.

Bütün zayıflamaları topladığımızda $1\text{dBm} + 2,5\text{dBm} + 2\text{dBm} + 6,02\text{dBm} + 15,05\text{dBm} + 1\text{dBm} = 28,2\text{dBm}$ gibi bir değer çıkmaktadır. +3 dBm çıkış sinyalinden bu değeri çıkarırsak -25,2dBm'lik bir sinyali ONT'ye ulaştırmış olacağız. Bu da ONT için uygun değer aralığında bir sinyal olup veri sağlıklı bir şekilde iletilir. Tabii bu zayıflama değerleri her şeyin en mükemmel olduğu durumlarda hesap edilmiştir. Gerçek saha düşünüldüğünde bu değer daha aşağılarda olabilmektedir.

Mevcut PON teknolojisinde şu ana kadar maksimum 1Gbps hız müşteri tarafında verilebilir durumdadır. İleri PON teknolojilerinde, farklı dalga boylarını da kullanarak önce 10Gbit [13] sonrasında 100Gb [14] hızlarını yeni nesil PON portları üzerinden verilecektir. Şu an test aşamasında olup yakın zamanda hayatımıza girmesi beklenmektedir. Fakat sürekli hızın artması internet servis sağlayıcılarını yeni yatırımlara zorlayacaktır. Burada sorgulanması gereken soru müşteri tarafında gerçekten bu hıza ihtiyaç olup olmadığıdır.

3 Sonuçlar

Bu makalede FTTH sistemlerinin ağ tasarımı, FTTH yapısını diğer FTTH yapılarından ayıran önemli özellikleri ve mimari yapısı hakkında bilgiler verilmiş olup, fiber optik kablo ve bölücülerin konumlandırılması hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Ayrıca örnek bir müşteri analiz edilerek OLT sonrası oluşabilecek zayıflamalar tek tek incelenerek en uygun şekilde tasarlanmaya çalışılmıştır. FTTH yapısı yaşanan coğrafyaya göre çok farklı şekillerde kurgulanabilir ve tasarlanabilir fakat makalede bahsi geçen yapıda dikey yapılaşmanın olduğu metropol şehirlerde hem yüksek müşteri sayısına ulaşmak hem de optimum seviyede fiber kablo ve bölücü kullanarak kullanıcıların ihtiyacı olan bant genişliğine istenilen internet hızında ulaştırılabilmesi hedeflenmiştir.

İnternet servis sağlayıcıları GPON üzerinden verilen internet hizmetini bireysel kullanıcılarda vermeyi hedeflemektedir. Bireysel internet hizmetlerinde verilen internet hızlarında upload değerleri düşük olduğundan kamusal ve endüstriyel alanlarda kullanımları düşüktür. Bu tür yerlerde ilgili alanlara fiber götürülüp upload hızı yüksek AON (Active Optic Network) teknolojileri kullanılmaktadır. Bu sayede kurumsal alanın güvenliği sağlanırken daha servis sağlayıcılar daha çok gelir elde etmektedirler.

GPON teknolojisinin bazı dezavantajlarından bahsedecek olursak; GPON altyapısının kurulumu, özellikle mevcut bakır kablo altyapısına sahip yerlerde yüksek maliyetli olabilir. Fiber optik kabloların döşenmesi, yeni donanım ve ekipman gereksinimleri nedeniyle başlangıç maliyetleri yüksektir. Hem de Fiber optik kabloların bakımı ve onarımı, bakır kablolarla göre daha zordur ve özel ekipman gerektirir. Fiber kabloların hasar görmesi durumunda onarım maliyetleri yüksek olabilir. Ayrıca GPON, pasif bileşenler (optik bölücüler) kullanır, bu da sinyal gücünün her bölücü

noktasında azalmasına neden olur. Bu sınırlama, ağın toplam mesafesini ve kullanıcı sayısını etkileyebilir. Bununla birlikte GPON ağında, birçok kullanıcı aynı optik fiber hattını paylaşır. Bu, yoğun kullanım dönemlerinde bant genişliği paylaşımı nedeniyle performansın düşmesine neden olabilir. Bu dezavantajlara rağmen, GPON teknolojisi yüksek hızlar ve güvenilirlik sunarak, birçok kullanıcı için cazip bir seçenek olmaya devam etmektedir. Altyapı maliyetleri düşmeye devam ettikçe ve teknolojik gelişmeler oldukça, bu dezavantajların bazıları zamanla azalabilir.

Sonuç olarak şehir merkezinde bulunan nüfus ve abone potansiyeli göz önünde bulundurulduğunda eve kadar fiber teknolojisi hem işletme hem de maliyet açısından avantajlıdır. Ayrıca 1000Mb ve üzeri hızlarda müşteri memnuniyeti de sağlayacaktır. Bununla birlikte çok sayıda aboneye ulaşmanın ve mevcut yer altında bulunan yüksek kapasiteli bakır kablolarında sökümü sonrasında elde edilecek maddi anlamda geri dönüşü de düşünüldüğünde FTTH sistemleri il ve ilçe merkezleri için çok uygun bir teknolojidir. OLT cihaz ve kart maliyetlerinin yüksek olması, kırsal alanda ulaşılabilecek abone sayısının azlığı, yapılan fiber kablo ve cihaz yatırımının maddi anlamda geri dönüşünün uzun yıllar alması gibi sebepler göz önünde bulundurulur ise diğer FTTC, FTTB...vb gibi yapılar gözden geçirilerek hangisinin en uygun olacağına karar verilip sahada imalat edilerek son kullanıcıya internet hizmeti götürülebilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %11

Kaynaklar

- [1] Paul. W. Shumate, Fiber-to-the-Home, Journal Of Lightwave Technology, 26, NO. 9, 1977–2007, 2008. <https://doi.org/10.1109/JLT.2008.923601>
- [2] E. Kayhan, Dalga boyu bölmeli çoğullama yöntemini kullanan bir Gigabit Pasif Optik Ağ sisteminin modellenmesi ve performans analizi. Yüksek Lisans Tezi. Uludağ Üniversitesi, Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Bursa, 2015.
- [3] S. Acar, Yeni nesil sabit erişim şebekelerine (FTTX) geçiş sürecinde düzenleyici yaklaşımlar: Uluslar arası örnekler ve Türkiye için öneriler. Uzmanlık Tezi, Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu, Ankara, 2009.
- [4] C.H. Lee, W.V. Sorin, B.Y. Kim, Fiber to the home using a PON infrastructure. Journal of Lightwave Technology, 24(12): 4568-4583, 2006 <https://doi.org/10.1109/JLT.2008.923601>
- [5] W. Tomasi, Advanced Electronic Communications Systems Prentice Hall, New York, 2006.
- [6] Huawei Networking Products <https://huaweiswitch.wordpress.com/2015/05/13/whats-gpon-and-why-gpon/> Accessed 13 May 2015.
- [7] John M. Senior, Optical Fiber Communications, Prentice Hall, New York, 2005.
- [8] Z. Onursal, 2012. Gigabit passive optical networks (GPON) and the network analysis in the fiber to the home (FTTH) project applications in Ankara. Master Thesis, Çankaya University, Faculty of Electronic and Telecommunication Engineering, Ankara.
- [9] S. M Abdikani, Design of a Fiber to The Home FTTH Access Network in Somalia Using GPON Technology. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Aydın Üniversitesi, Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 2021.
- [10] Türk Telekomünikasyon A.Ş Müşteri modemi hat değerleri kontrolü sırasında, sahada çalışan sistemlerinden alınan verileri Ortak Yönetim Sistem ekranlarına yansıtır. <https://ttoys.turktelekom.com.tr:8255> Accessed: 28.05.2024.
- [11] Huawei Optical Terminal ONT specifications data sheet. <https://e.huawei.com/en/products/opticalterminal/en8145b7ns> , Accessed: 28 May 2024).
- [12] H. Erkan, Next-generation ring based self-healing WDM-PON architecture with private networking capability and wavelength sharing. Ph.D. Thesis, The City University of New York, New York, 2008
- [13] GPON-EPONcomparison. Accessed 12 March 2014. <http://www.commscope.com>
- [14] Nokia showcases first 100Gb / second fiber broadband technology in the US. Accessed 15 June 2024. <https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2022/06/13/nokia-showcases-first-100gbsecond-fiber-broadband-technology-in-the-us/>





İlgın sahası (Konya) Miyosen yaşlı bitümlü kilttaşlarında organofil element incelemeleri: Besin girdisi ve paleo-üretkenliğin etkisi

Organophile element investigations in Miocene bituminous claystones of İlgın field (Konya): Effect of nutrient input and paleo-productivity

Ali Sarı¹ , Kamal İsmayılzada² , Sinan Akıska^{3,*} , Fuat Erol⁴ 

^{1,3} Ankara Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06830. Ankara Türkiye

² Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 06100. Ankara Türkiye

⁴ Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu Genel Müdürlüğü, Ankara Türkiye

Öz

Bu çalışmada İlgın sahası bitümlü kilttaşlarının çökelişi sırasında fitoplankton algler için biyobesin element olan P'un yanında suda çözülmüş haldeki Cu, Ni, Zn, Cd, Ba ve Se gibi elementlerinin de organik madde ile olan davranışları incelenmiştir. Göl ve denizel ortamlarda fito ve zooplankton alglerin biyolojik üretkenliklerinde N ve P gibi besin elementlerin yanında Cu, Ni, Zn, Cd, Ba ve Se gibi elementlerde besin maddesi elementler olarak davranırlar. Bitümlü kilttaşlarındaki organik madde (%TOC) bolluğu, sudaki algal üretkenlik ve biyobesin element olan P'un yanında organik yapıya organometalik ligantlar şeklinde bağlanan Cu, Ni, Zn, Cd, Ba ve Se gibi biyobesin elementlerle de yakın ilişkilidir. Bu amaçla incelenen örneklerde; %TOC'nin sırasıyla Cu ($r=0.122$), Ni ($r=0.002$), Zn ($r=0.081$), Cd ($r=-0.279$) ve Ba'la ($r=-0.661$) çok zayıf veya zayıf, Se ($r=0.685$) ile orta kuvvette korelasyon ilişkisi vardır. Bu durum, sadece Selenyumun organofil bir element olduğunu gösterir. Yine, incelenen örneklerde; Cu'nun Fe ($r=0.220$) ve S ($r=0.216$), Ni'nin Fe ($r=0.029$) ve S ($r=-0.065$), Zn'nin Fe ($r=-0.142$) ve S ($r=-0.135$), Cd'nin Fe ($r=0.379$) ve S ($r=0.262$) ve Ba'un S ile ($r=-0.515$) çok zayıf; Se'nin Fe ($r=0.696$) ve S ile ($r=0.732$) kuvvetli korelasyon ilişkisinin olması, sadece Se'nin sülfidli ve sülfatlı bileşikler şeklinde çökelmiş olduğunu göstermektedir. Yine, incelenen örneklerde; Cu'nun Mn ($r=-0.52424$) ve Zn ($r=-0.16381$) ile çok zayıf, Ba'un Mn'la ($r=0.750667$) olan kuvvetli korelasyon ilişkisi, ortamda sadece Ba'un, Baryum Permanganat [$Ba(Mn_2O_8)$] şeklinde çökelmiş olduğunu gösterir.

Abstract

In this study, in addition to P, which is a bionutrient element for phytoplankton algae, during the deposition of bituminous claystones in the İlgın area, the behavior of elements such as Cu, Ni, Zn, Cd, Ba and Se dissolved in water with organic matter was examined. In addition to nutrients such as N and P, elements such as Cu, Ni, Zn, Cd, Ba and Se act as nutritional elements in the biological productivity of phyto and zooplankton algae in lake and marine environments. The abundance of organic matter (%TOC) in bituminous claystones is closely related to bionutrient elements such as Cu, Ni, Zn, Cd, Ba and Se, which are bound to the organic structure as organometallic ligands, as well as P, which is an algal productive and bionutrient element in the water. In the analyzed samples, %TOC exhibits a very weak or weak correlation relationship with Cu ($r=0.122$), Ni ($r=0.002$), Zn ($r=0.081$), Cd ($r=-0.279$) and Ba ($r=-0.661$) respectively, while displaying a moderately strong correlation with Se ($r=0.685$). This indicates that Selenium specifically exhibits an organophilic element. Moreover, in the examined examples; Cu shows very weak correlations with Fe ($r=0.220$) and S ($r=0.216$), Ni shows weak correlations with Fe ($r=0.029$) and S ($r=-0.065$), Zn demonstrates weak correlations with Fe ($r=-0.142$) and S ($r=-0.135$); Cd displays moderate correlations with Fe ($r=0.379$) and S ($r=0.262$); and Ba exhibits very weak correlations with S ($r=-0.515$). Conversely, Se shows a strong correlation with Fe ($r=0.696$) and S ($r=0.732$), indicating that only Se is precipitated in the form of sulfide and sulfate compounds. Furthermore, in the analyzed examples; Cu displays a very weak correlation with Mn ($r=-0.524$) and Zn ($r=-0.163$), while Ba shows a strong correlation with Mn ($r=0.750$). This suggests that Ba might have precipitated in the form of Barium Permanganate [$Ba(Mn_2O_8)$].

Anahtar kelimeler: Bitümlü kilttaş, Organofil element, Besin girdisi, Paleo-üretkenlik, Organik madde

Keywords: Bituminous claystone, Organophile element, Nutrient input, Paleo-productivity, Organic matter

1 Giriş

Bitümlü kayaçlar (bitümlü şeyl, bitümlü kilttaş, bitümlü marn) su derinliği, yüzey veya alt akıntıların kuvveti, su

sütünü üretkenliğinin yoğunluğu, organik madde türleri, sedimentasyon oranları, tortu birikimi, su kolonundaki oksijen konsantrasyonları gibi bir dizi koşullarla ilgili olarak çok geniş bir depolanma aralığında çökellerler [1-5]. Sucul

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: akıska@eng.ankara.edu.tr (S. Akıska)

Geliş / Received: 05.02.2024 Kabul / Accepted: 23.07.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1431830

ortamların biyolojik üretkenliği P ve N gibi besin unsurlarının mevcudiyeti ile kuvvetle kontrol edilir [6-10]. Birçok iz metal biyojeokimyasal döngü süreçlerinde yer alırlar, bazı metaller ise önemli biyo-besin maddelerini temsil ederler ve organizmaların yaşaması için gereklidir. [7, 11]'e göre biyo-besin elementlerin (Ni, Cu, Zn, P) sucul ortamlardaki artışı birincil üretkenlikteki artışı tetikleyebilir. Bu nedenle bitümlü kayaçlarda organik madde bolluğu ve metal zenginleşmeleri açısından biyo-besin elementler ile biyolojik üretkenlik ilişkisi son derece önemlidir. Su kolonunda canlılar için yeterli miktarda çözülmüş oksijen ile biyo-besin elementler olan N ve P'un bulunması durumunda fito ve zooplankton algler suda çözülmüş halde bulunan Cu, Ni, Zn, Cd, Ba ve Se gibi metalleri de tıpkı N ve P gibi biyo-besin olarak kullanırlar, onları sudan organo metalik ligandlar şeklinde bünyelerine alırlar ve dip sedimentleri içerisinde taşıyarak zenginleşmelerine neden olurlar [7,9,12,13]. Bitümlü killi kayaçların yüksek organik madde içeriği ve çevre kayaçlarına göre de çok yüksek miktarlarda ana, iz ve nadir toprak elementlerini biriktirmeleri, dip koşullarının oksijensiz indirgen anoksik koşulları nedeniyle [9,14-17]. Dünyada pek çok ülkede bitümlü şeyller ve bitümlü kilitaşları tıpkı bir maden yatağı gibi değerlendirilmektedir [1-10]. Bu tip kayaçlarda; U, Th, P, Mo, V, Cu, Zn, Ni, Cr, Co, Pb, Au, ve Ag gibi elementler çevre kayaçlara nazaran daha fazla zenginleşirler. Örneğin; Norveç [18], Venezuela [19], Meksika [20], Finlandiya [21], Amerika Birleşik Devletleri [22-24], Kanada [25-27] gibi ülkelerde bitümlü kayaçlardan U, Ag, Se ve Te gibi metallerin ekonomik miktarlarda üretildiği bilinmektedir. Dünyada bitümlü kayaçları dışardan retortlamak (ısıtmak) suretiyle (insitu veya exsitu yöntemleriyle) Estonya, ABD, Rusya, Çin, Ürdün ve Kanada gibi pek çok ülkede petrol üretilmektedir [28-29]. Görüldüğü üzere bitümlü kayaçlardan dünyada hem enerji kaynağı olarak petrol üretiminde hem de maden yatağı olarak metal üretiminde yararlanılmaktadır. Bu makale kapsamında Ilgın paleo-göl havzasında depolanmış olan bitümlü kilitaşlarındaki petrole kaynak olan organik madde zenginliğinin başlıca nedeni olan biyo-besin elementler ile paleo-üretkenlik ilişkisi incelenmiştir. Bu kapsamda fitoplankton alglerin üretkenliği için biyo-besin elementler olan N ve P'un yanında yine biyobesin elementlerden Cu, Ni, Zn, Cd, Ba ve Se'un organik madde (%TOC) ile olan ilişkileri incelenerek zenginleşme koşulları ve paleo ortamsal şartlarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

2 Stratigrafi

Ilgın linyitli kömür sahası Konya ilinin kuzeybatısında yer alır (Şekil 1). Sahada şu anda alt kömür ve üst kömür olarak iki adet ana kömür damarı bulunmakta olup, halen işletilmekte olan kömür kalınlığı ise 0.60-21,55m arasındadır. Havzada Alt kömür damarının çökeliminden sonra başlangıçta 50 cm kalınlığında bitümlü kilitaşı seviyesi çökelmiş ancak akabinde gölün tekrar sığlaşması sonucu ikinci bir kömür tabakasının çökelimi gerçekleşmiştir. Daha sonra kömür çökelimini takiben gölün yavaş yavaş derinleşmeye başlaması ile birlikte gölde artan P ve N gibi besin maddelerinin yanında suda artan oksijen gölde

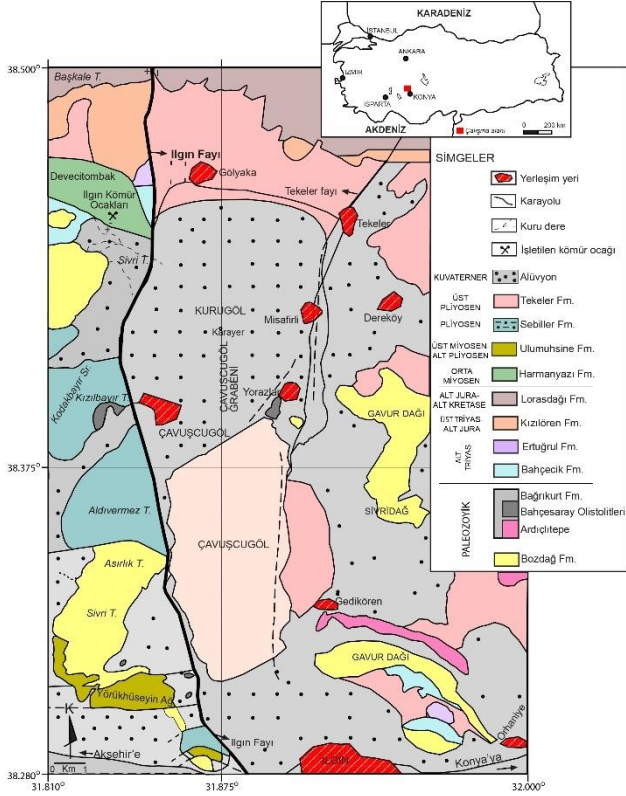
fitoplankton algal yaşamı hızlandırmıştır. Sucul ortamlarda fitoplankton alglerin biyolojik üretkenliği onlar için temel yaşam maddesi olan başta P olmak üzere besin maddesi elementlerin varlığı tarafından kuvvetli bir şekilde kontrol edilir. Ilgın Havzasında paleo-üretkenliğin aşırı derecede artması ve fitoplankton algler için göldeki besin (P) ve oksijen kaynağının yetersiz kaldığı süre içerisinde alglerin ölümü sonucu bitümlü kilitaşı çökelimi gerçekleşmiştir.



Şekil 1. İnceleme alanına ait yer bulduru haritası (harita verisi: Google, ©2013 / Landsat / Copernicus).

Bu makalede kullanılan stratigrafik istif "General Topics in Geology and Earth Sciences 1 (Chapter II)" [30] kitap bölümünden alınmıştır. Ilgın (Konya) havzasının da içinde bulunduğu bölgede Paleozoyik ve Mesozoyik yaşlı stratigrafik birimler, etkili olan Alpin tektonik hareketleri nedeniyle yoğun bir deformasyon geçirmişlerdir. Çalışılan alanda Paleozoyik yaşlı bir temel üzerinde Mesozoyik yaşlı stratigrafik birimler açılı uyumsuz olarak bulunurlar [31]. Sahada, stratigrafik birimler alttan üste doğru açılı uyumsuz olarak şu şekilde sıralanırlar; En altta, Alt Triyas yaşlı metakirintililer ve fillitlerden oluşan Bahçecik formasyonu ile yine Alt Triyas yaşlı metakarbonat-metakirintililer ardalanmasından oluşan Ertuğrul formasyonu ve onunda üzerinde Üst Triyas-Alt Jura yaşlı bitüm kokulu dolomitlerden oluşan Kızılören formasyonu yer alırken, onun da üzerinde ise Alt Jura-Alt Kretase yaşlı dolomit ve kalsitik dolomitlerden oluşan Lorasdağı formasyonu yer alır. Mesozoyik yaşlı bu stratigrafik birimlerin üzerinde de yine açılı uyumsuz olarak Neojen yaşlı formasyonlar bulunmaktadır. Bu formasyonlarda alttan üste doğru sırası ile; bitümlü kilitaşı, marn ve kömürden oluşan Orta Miyosen (Orta Serravaliyen) yaşlı [32] Harmanyazı formasyonu, onun üzerinde tabanında konglomera ile başlayan ve üst seviyelerde kireçtaşlarından oluşan Üst Miyosen-Alt Pliyosen yaşlı Ulumuhsine formasyonu; genellikle kilitaşı, konglomera ve değişik boyutlu malzemelerden oluşan Pliyosen yaşlı Sebiller formasyonu ile en üstte ise karbonat ve demir çimentolu, değişik büyüklükte kireçtaşı ve dolomit

parçalarından oluşan Üst Pliyosen-Kuvaterner yaşlı Tekeler formasyonu yer alır [31]. İstifin en üstünde ise Neojen yaşlı formasyonların üzerinde de güncel alüvyonlar yer almaktadır (Şekil 2,3).



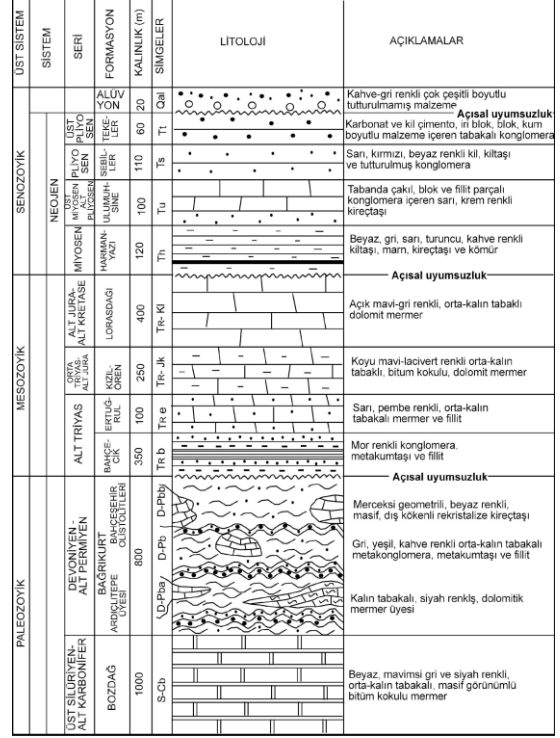
Şekil 2. İnceleme alanına ait jeolojik harita [31].

3 Materyal ve metot

Bu çalışmadaki inceleme materyallerini, İlgın (Konya) sahasındaki linyit kömürlerinin hemen üzerinde yer alan, organik maddece çok zengin bitümlü kilitaşı seviyelerine ait kayaç örnekleri oluşturur. Sahadan alınan bitümlü kilitaşı örneklerinin Ana ve İz element analizleri Ankara Üniversitesi YEBİM laboratuvarında ICP-OES (Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry) model cihaz (deteksiyon limitleri $\mu\text{g/L}$ aralığında olup, hata payı 0.1 ppm'dir) kullanılarak yapılırken, kayaçların organik madde miktarlarının belirlenmesi için Pirolez analizleri de (%TOC analizi) TPAO Ar-Ge Merkezi Müdürlüğü laboratuvarlarında Rock-Eval VI cihazı ile IFP 160000 standardı (güvenilir kaya değerlendirme parametrelerinin elde edilebilmesi için başlangıç ağırlığı tüm kayalar için 0.5 mg, kerojen ve kömürler için ise 0.02 mg hassasiyetle ölçülür (örn. $S_2 \pm 0.5 \text{ mg/g}$ kaya, TOC ve MinC $\pm 0.1\text{wt}\%$)) kullanılarak yapılmıştır.

4 Jeokimyasal incelemeler

Bu çalışmada sahada Harmanyazı Formasyonu'nun en iyi görüldüğü yerden tabandaki kömürlü seviyeden başlayarak tavana kadar sistematik olarak bitümlü kilitaşılarından 14 adet örnekle yapılmıştır (Şekil 4). Sahadan derlenen bitümlü kilitaşı örneklerine ait majör ve minör element analiz sonuçları da (Tablo 1)'de verilmiştir.



Şekil 3. İnceleme alanının geliştirilmiş dikme kesiti [31]

ÖRNEK ADI	KALINLIK (m)	LİTOLOJİK BİRİM
OR-14	40 cm	Bitümlü Kilitaşı
OR-13	30 cm	Bitümlü Kilitaşı
OR-12	40 cm	Bitümlü Kilitaşı
OR-11	20 cm	Bitümlü Kilitaşı
OR-10	25 cm	Bitümlü Kilitaşı
	4 cm	Kilitaşı
OR-9	10 cm	Bitümlü Kilitaşı
OR-8	40 cm	Bitümlü Kilitaşı
OR-7	100 cm	Bitümlü Kilitaşı
OR-6	20 cm	Bitümlü Kilitaşı
OR-5	20 cm	Bitümlü Kilitaşı
OR-4	200 cm	Bitümlü Kilitaşı
OR-3	100 cm	Bitümlü Kilitaşı
OR-3/2	20 cm	Bitümlü Kilitaşı
OR-2	40 cm	Bitümlü Kilitaşı
OR-1 Ara Linyit	50 cm	Linyit
OR-1	50 cm	Bitümlü Kilitaşı
OR-1 Alt Linyit	1000 cm	Linyit

- ölçeksiz -

Şekil 4. Harmanyazı Formasyonu'na ait ölçülmüş stratigrafik kesiti.

Tablo 1. Harmanyazı Formasyonu bitümlü kıltaşı örneklerine ait TOC, ana ve iz element sonuçları.

	TOC	Cu	Ni	Zn	S	Si	Cr	Zr	Fe	Mn	Al	P	Se	Ba	Ti	Cd
	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
OR-14	14.52	1.5	2.6	28.9	17698.1	55858.9	19.8	31.2	23219.9	1107.5	4927.7	408.4	1.0	139.9	441.2	0.8
OR-13	34.32	16.2	24	42.2	91794.6	141855.9	32.2	50.7	109633.5	100.9	16355.3	540.6	1.9	70.3	1017.3	1.1
OR-12	21.00	9.8	35.5	30.0	36797.9	152372.4	88.2	33	43162.3	556.0	13804.1	418.0	1.2	94.6	620.4	0.8
OR-11	41.52	7.5	14.4	25.8	82943.5	113578.2	5.0	16.9	87269.0	81.9	4472.5	398.4	2.2	29.1	603.6	0.7
OR-10	26.50	11.0	14.8	40.7	43614.4	197756.9	9.3	30.2	64715.7	196.0	9246.8	335.1	2.5	59.6	529.9	0.6
OR-9	23.33	6.9	20.2	39.6	59754.6	87964.6	16.2	48.6	93068.4	271.	14058.2	360.4	2.0	89.6	1411.8	0.8
OR-8	37.69	14.0	31.1	48.5	37050.2	132928.6	23.5	73.4	72048.3	335.3	33642.3	373.9	1.5	115.0	2556.8	1.0
OR-7	44.44	14.0	22.7	44.2	52345.3	114139.1	36.2	50.8	61260.5	220.8	24474.8	289.3	1.6	77.9	1606.0	0.7
OR-6	16.29	5.9	9.8	32.7	35207.9	227390.1	8.6	23.4	53927.9	546.0	8839.3	434.6	0.3	75.6	890.25	0.8
OR-5	40.99	14.9	17.4	50.9	93156.3	45758.4	26.6	17.4	110266.8	137.1	9093.3	847.9	3.2	45.5	601.8	0.7
OR-4	28.93	28.0	37.6	80.7	28603.7	294181.6	29.4	36.9	41795.8	322.1	31054.0	398.8	1.5	112.0	1074.9	0.7
OR-3	37.12	21.0	20.0	29.5	116665.7	65940.7	6.1	20.7	150207.2	59.2	4885.4	284.5	2.1	52.5	458.0	0.9
OR-3/2	34.51	16.1	24.2	58.0	59314	177425.0	13.9	14.4	97812.4	126.7	1400.5	263.1	2.0	39.8	293.7	0.5
OR-2	31.07	8.0	14.5	28.4	77897.2	48950.8	6.0	32.7	129542.6	363.2	12353.8	401.9	1.9	67.8	806.3	0.9
Ara Linyit	51.19	9.5	12.2	58.1	84225.1	9296.5	4.1	8.5	75614.6	85.1	5213.6	211.2	2.4	27.4	366.8	0.6
OR-1	36.41	16.1	15.9	14.0	100165.1	50105.2	56.5	15	153762.4	184.3	18504.3	405.8	2.8	83.0	949.6	0.8
Alt Linyit	47.26	15.1	9.6	14.9	26577.1	25562.1	15.5	29.9	14776.3	197.7	6266.9	120.8	0.6	32.5	511.3	0.5

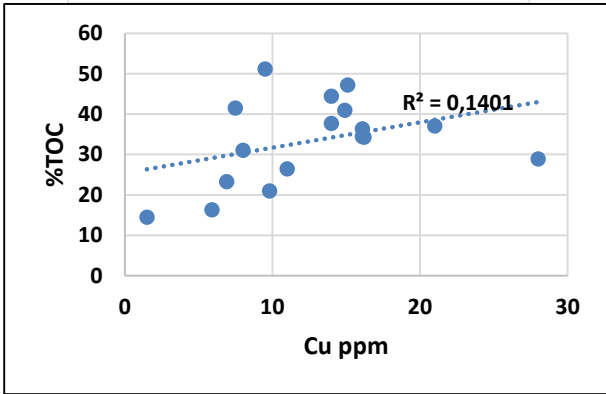
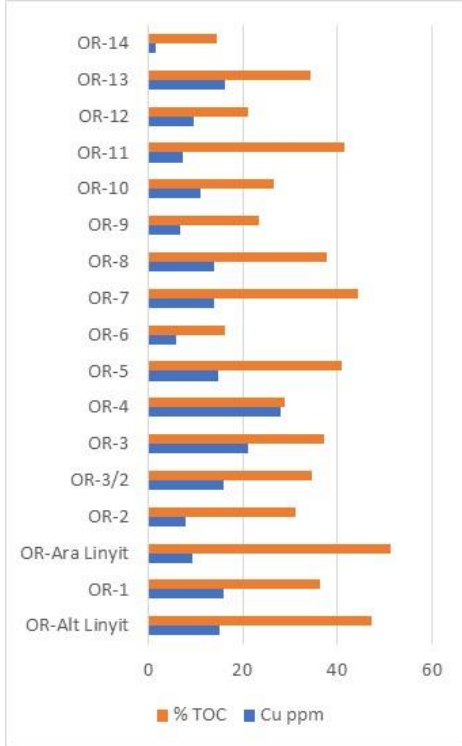
4.1 Bakır (Cu)'ın jeokimyasal davranışları

Cu, sucul ortamlarda fito ve zooplankton algler için besin görevi görür, organik madde ile organometalik ligandlar oluşturur ve Fe-Mn oksid-hidroksitlere adsorpsiyon yolu ile de çok hızlı bir şekilde su sütunundan ayrılarak sedimentte birikir [9,12]. Organik maddenin bozunması ve/veya Fe-Mn oksid-hidroksit fazlarının indirgeyici ortamlarda çözülmesinden sonra Cu, tekrar gözenek sularına salınır ve sülfat indirgeme koşullarında Fe-sülfidler (CuS ve CuS₂)

şeklinde veya pirit'e adsorpsiyon veya adsorpsiyon yaparak çökelir [9,33,34].

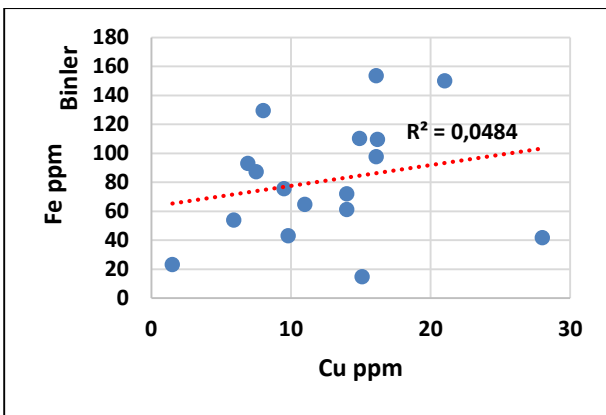
İlgili sahasında sistematik olarak derlenen örneklerdeki Cu ve %TOC dağılımları Şekil 5a'da görülmektedir.

Bitümlü kıltaşı örneklerinde Cu ve %TOC arasında zayıf korelasyonun ($r=0.374331$) bulunması, Cu'nun su kolonunda organik maddeye adsorpsiyon yaparak organo-metalik ligand şeklinde sediman içerisine taşınımının çok az olduğunu göstermektedir (Şekil 5b).



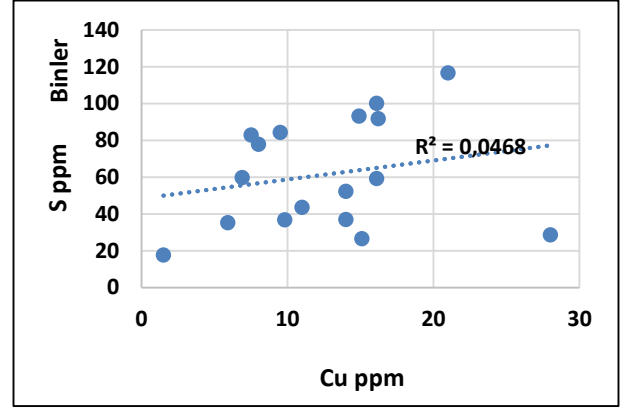
Şekil 5. (a) İlgin sahası bitümlü kayaçlarında Cu (ppm) ve % TOC dağılımı, (b) Cu'nun % TOC ile korelasyon ilişkisi.

Yine, incelenen tüm örneklerde Cu'nun Fe'le ($r= 0.220112$) zayıf bir korelasyon ilişkisi vardır (Şekil 6).



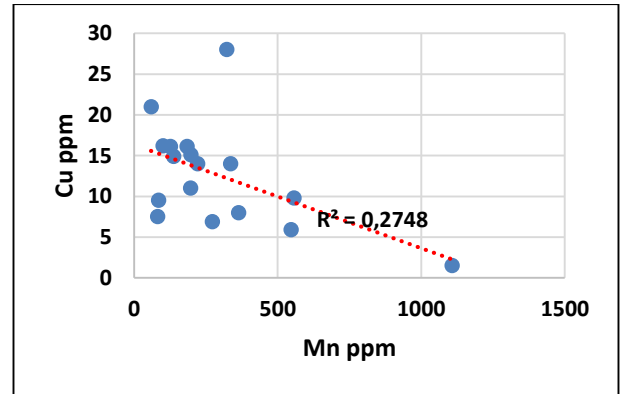
Şekil 6. Cu'nun Fe ile korelasyon ilişkisi.

Yine, incelenen bitümlü kiltası örneklerinde; Cu'nun kükürtle (S) ($r=0.216334$) zayıf bir korelasyon ilişkisi vardır (Şekil 7).



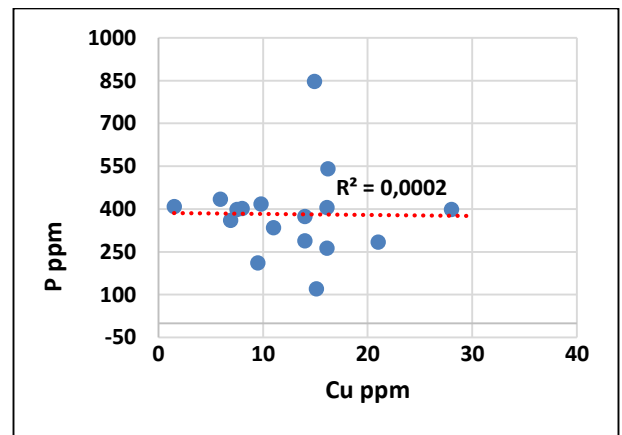
Şekil 7. Cu'nun S ile korelasyon ilişkisi.

Ayrıca, incelenen örneklerde Cu'nun Mn ile ($r= -0.52424$) çok zayıf bir korelasyon ilişkisi söz konusudur. Bu durum Cu'nun su kolonundan süpürülmesi ve sediment içerisinde zenginleşmesinde Mn oksit-hidroksitlerin hiçbir etkisinin olmadığını gösterir (Şekil 8).



Şekil 8. Cu'nun Mn ile korelasyon ilişkisi.

Yine, Cu'nun besin maddesi olan fosforla (P) çok zayıf bir korelasyon ($r=-0.01539$) ilişkisi bulunmaktadır (Şekil 9).

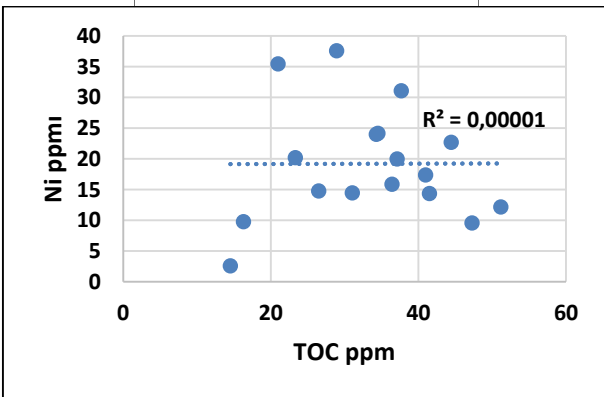
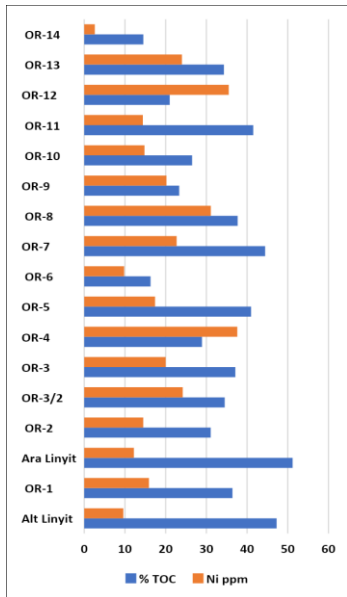


Şekil 9. Cu'nun P ile korelasyon ilişkisi

4.2 Nikel (Ni)'in jeokimyasal davranışları

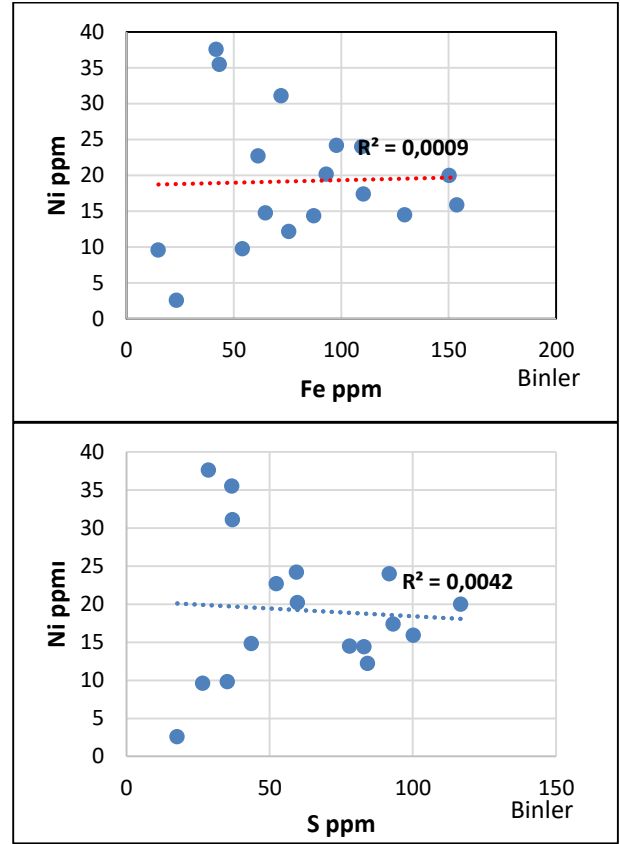
Nikel'de tıpkı Cu gibi, su kolonundaki planktonik canlılar için bir mikro besin maddesi olarak davranır ve organik madde ile organometalik kompleksler şeklinde kompleksleşmesi Ni'in su sütunundan süpürülme işlemini hızlandırır, organik maddenin parçalanması sırasında serbest bırakıldığı içinde indirgen dip koşulları altında tortuda zenginleşir [9]. Orta derecede indirgeyici (disoksik/suboksik) koşullar altında sülfidlerin ve Mn'nun yokluğunda Ni gözenek suyuna salınır veya oksijence minimum olan sülfat indirgeyici ortamlarda ise ortamdaki herhangi bir serbest S ile bağlanır ve NiS'ü yapar veya çözünmeyen NiS olarak pirit içerisine dahil olabilir [33,34].

İlgın paleo-göl havzasında yapılan redoks çalışmaları ortamın oksijence minimum ve oldukça indirgen olduğunu göstermektedir. Çalışma alanına ait sistematik olarak derlenen örneklerdeki Ni elementi ile % TOC dağılımları Şekil 10a'da verilmiştir. Ancak, incelenen bitümlü kilitaşlarında Ni'in %TOC ile çok zayıf korelasyonunun ($r=0.002288$) bulunması Ni su sütunundan süpürülmesi ve sediman içerisine taşınmasında genel olarak organik maddenin önemli bir rolünün olmadığı görülmektedir (Şekil 10b).



Şekil 10. (a) İlgın Sahası bitümlü kayaçlarında Ni (ppm) ve % TOC dağılımları, (b) Ni'in % TOC ile korelasyon ilişkisi.

Yine; incelenen bitümlü örneklerde Ni'in Fe ($r=0.029961$) ve S'le ($r=-0.065$) olan çok zayıf korelasyonları bulunmaktadır (Şekil 11).

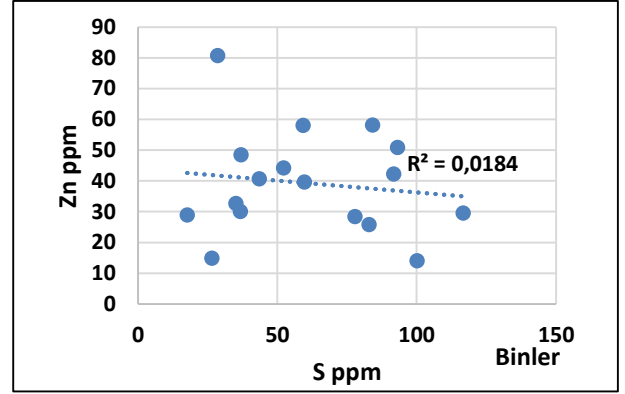
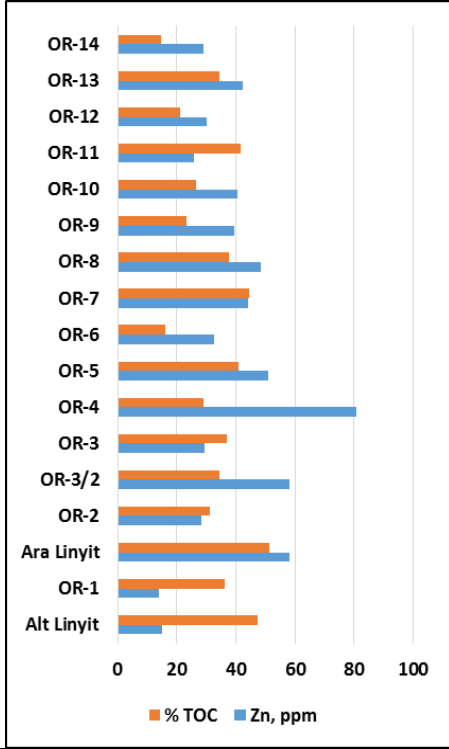


Şekil 11. Ni'in Fe ve S ile korelasyon ilişkisi.

4.3 Çinko (Zn)'nun jeokimyasal davranışları

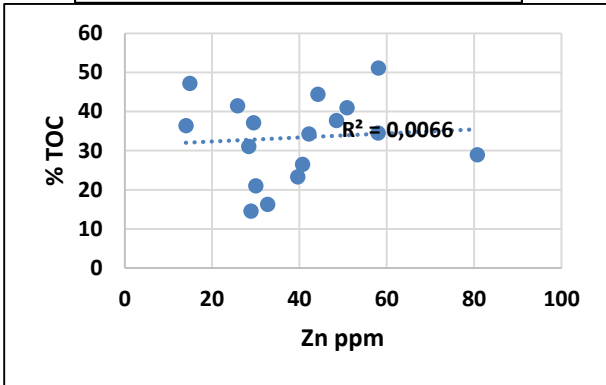
Çinko (Zn) da tıpkı Cu ve Ni gibi sucul ortamlarda fito ve zooplankton algal canlılar için bir mikro besin maddesidir ve organik kompleksleri oluşturur, Fe-Mn-oksihidroksitlerin üzerine adsorbe olur, ZnS olarak piritte dahil edilir veya minimum oksijenli sülfat indirgeme koşulları altında ZnS şeklinde kendi sülfidli sülfidlerini özellikle de sfaleriti [(Zn,Fe)S] oluşturur ve bitümlü killi kayaçlarda zenginleştirilir [9,33,34].

Çalışma alanından sistematik olarak derlenen bitümlü kilitaş örneklerindeki Zn elementi ile % TOC dağılımları Şekil 12a'da görülmektedir. İncelenen örneklerde Zn'nun %TOC ile çok zayıf korelasyonunun ($r=0.081467$) bulunması Zn'nun su sütunundan organik maddeye absorpsiyon şeklinde bağlanarak organometalik kompleksler şeklinde sediman içerisine taşınmasında genel olarak organik maddenin hiçbir rolünün olmadığını göstermektedir (Şekil 12b).



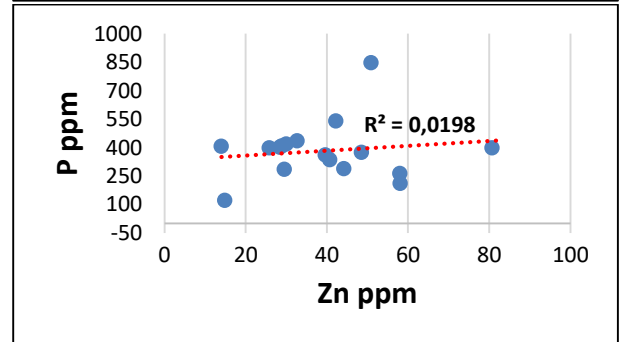
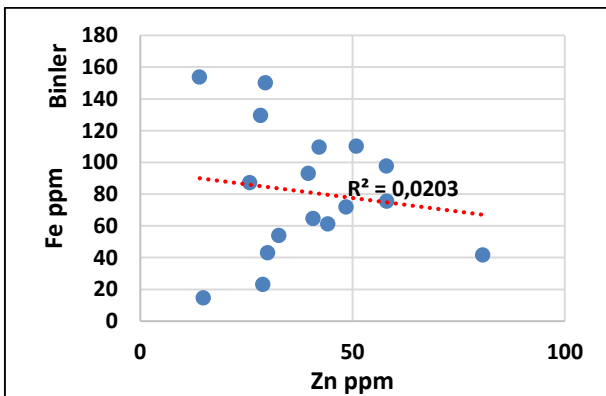
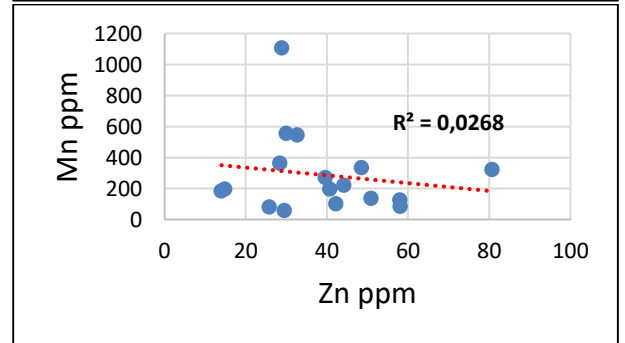
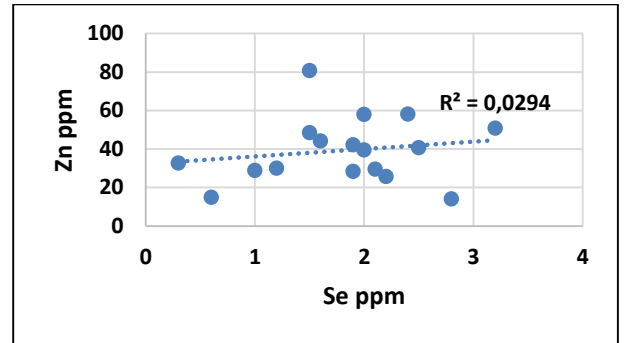
Şekil 13. Zn'nun Fe ve S ile korelasyon ilişkisi.

Çinko'nun (Zn) su kolonundan süpürülerek dip çamurlarında zenginleşmesinde Mn oksit-hidroksitlerin rolü yanında Zn'nun diğer besin maddesi elementler olan Fosfor'la (P) ve Selenyum'la (Se) olan davranışları da incelenmiştir. Zn'nun Mangan (Mn) ($r=-0.16381$), Fosfor (P) ($r=0.140809$) ve Selenyum'la (Se) ($r=0.171402$) çok zayıf bir korelasyon ilişkisinin olduğu belirlenmiştir (Şekil 14).



Şekil 12. (a) İlgın Sahası bitümlü kayaçlarında Zn (ppm) ve % TOC değerleri, (b) Zn'nun % TOC ile korelasyon ilişkisi.

Yine, incelenen örneklerde; Zn'nun demir (Fe) ($r= -0.14246$) ve kükürt (S) ($r= -0.13583$) ile çok zayıf bir korelasyon ilişkisinin olduğu görülmektedir (Şekil 13).

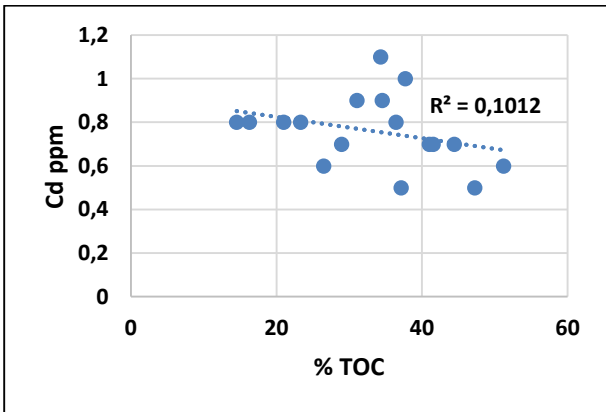
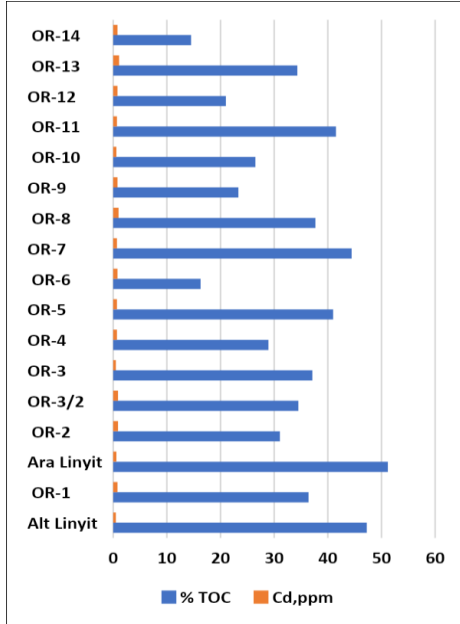


Şekil 14. Zn'nun Mn, Mo, P ve Se ile korelasyon ilişkisi.

4.4 Kadmiyum (Cd)'un jeokimyasal davranışları

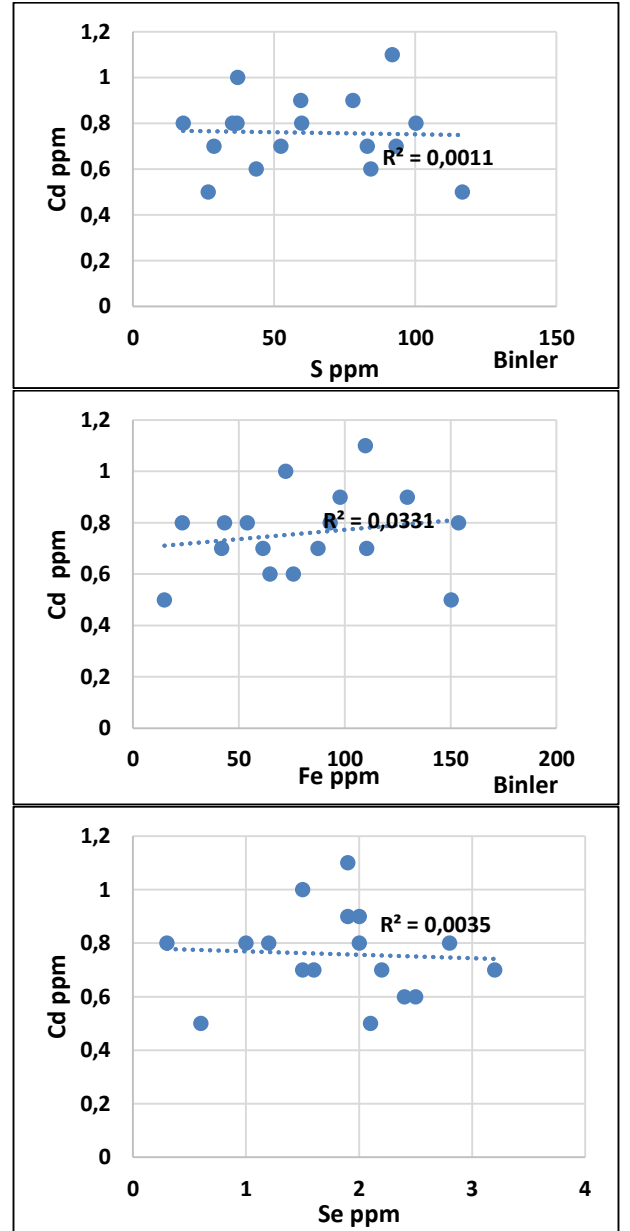
Ni, Cu, Zn, Ba ve Cd gibi eser elementler denizel planktonlar ile biyo-birikimi yansıtan organometalik kompleksler şeklinde baskın olarak tortuya taşınır [13] ve oksijensiz anoksik indirgeme koşullarında da tortuda zenginleşirler [13,35,36]. Kadmiyum (Cd), çoğunlukla oksijensiz indirgeme koşulları altında organik madde ve pirit (FeS) ile birlikte çökmekten çok, dip sedimentlerinde organik maddenin parçalanması sırasında organik yapıdan serbest bırakılan Cd, ortamdaki serbest kükürt ile CdS'ü oluşturarak sülfid fazında tortullarda zenginleşir [33].

İlgın Sahası bitümlü kayaçlarındaki Cd (ppm) ve % TOC bollukları Şekil 15a'da görülmektedir. İncelenen bitümlü kilitaşlarında Cd'nin %TOC ile çok zayıf korelasyonunun ($r = -0.27993$) bulunması (Şekil 15b) Cd'nin sapropelik çamurlar içerisinde organik yapıda olmadığını veya çok az miktarda olduğunu gösterir.



Şekil 15. (a) İlgın Sahası bitümlü kayaçlarında Cd (ppm) ve % TOC değerleri, (b) Cd'un % TOC ile korelasyon ilişkisi.

İncelenen örneklerde; Cd'un demir (Fe) ($r = 0.379346$) ve kükürt (S) ($r = 0.26276$) ile zayıf bir korelasyon ilişkisinin olduğu görülmektedir (Şekil 16).



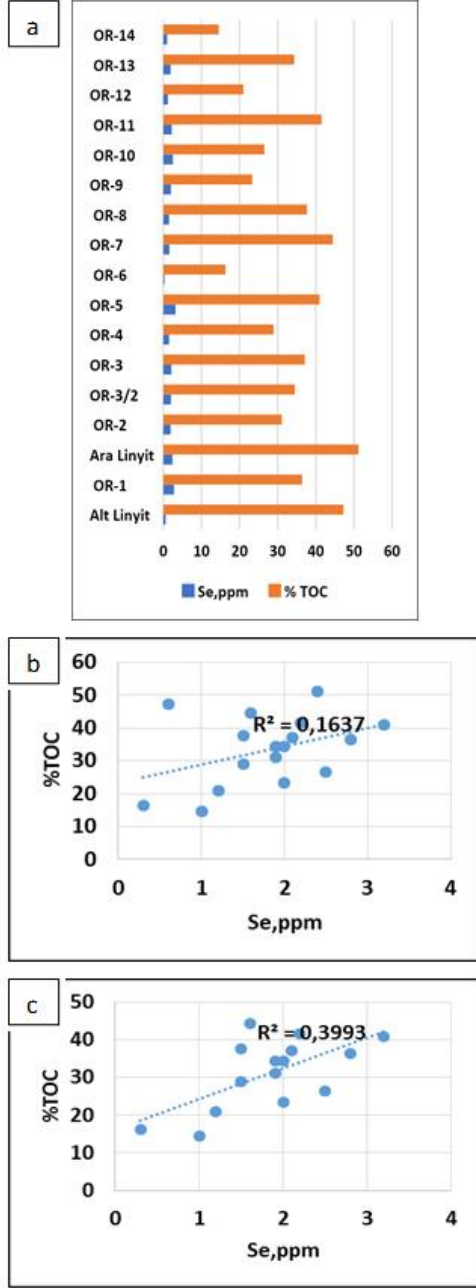
Şekil 16. Cd'un S, Fe ve Se ile korelasyon ilişkisi.

4.5 Selenyum (Se)'un jeokimyasal davranışları

Selenyum, diğer mikro besin elementler olan Cu, Zn, Ni ve Cd gibi Mn ve Fe-oksihidroksitlere ve organik moleküllere sıklıkla adsorbe olur. Selenyum (Se), kükürt ile aynı periyodik grubundadır ve jeokimyasal süreçlerde kükürt ile benzer davranışlar sergiler ve Se konsantrasyonları deniz suyunda oldukça düşüktür (<120 ppb) [37].

Çalışma alanına ait bitümlü kilitaşlarında Se ve % TOC dağılımları Şekil 17a'da görülmektedir. İncelenen örneklerde, KI-Alt linyit ve KI-Ara linyit kömürlerinin de olduğu değerlendirilmede Se'un %TOC ile ($r = 0.404653$ orta kuvvette bir korelasyonu ($r = 0.685$) söz konusudur (Şekil 17b). Ancak, incelenen örneklerden KI-Alt linyit ve KI-Ara linyit kömür örnekleri çıkartıldıktan sonra Se'un %TOC ile kuvvetli bir korelasyonu ($r = 0.631929$) söz konusudur (Şekil

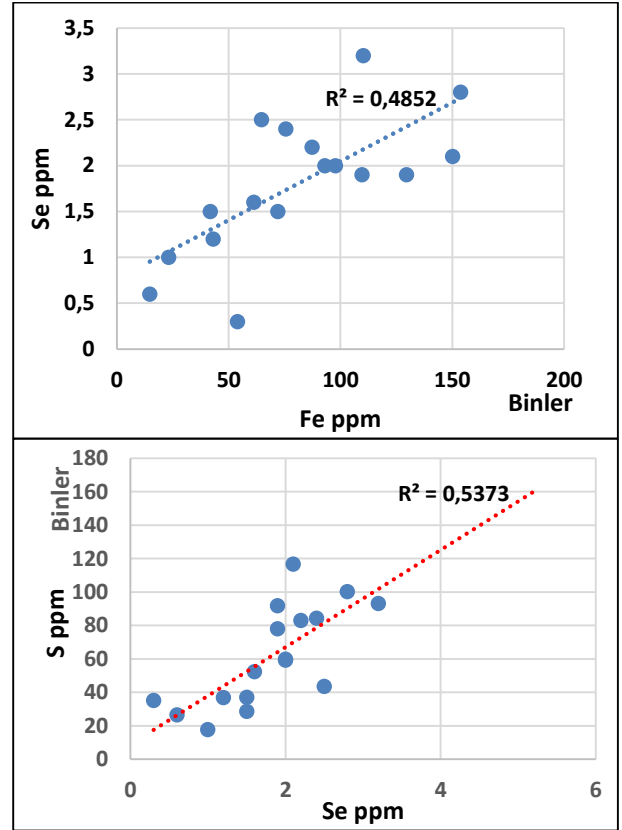
17c). Bu durum Ilgın sahası bitümlü kiltaşlarında Selenyumun algal organik madde ile ilişkili bir organofil element olduğunu ve organik maddeyle birlikte sediman içerine taşındığına işaret eder.



Şekil 17. (a) Ilgın Sahası bitümlü kayaçlarında Se (ppm) ve %TOC değerleri, (b,c) Se'un %TOC ile korelasyon ilişkisi.

Oksijensiz ve aşırı indirgen öksinik ortam koşulları altında Se, su kolonundan süpürülürken indirgen dip koşullarında pirit'teki S'nin yerini alabilir. Bu nedenle, Se hem bir organofilik gösterge ve hem de S ile birlikte indirgen ortam koşullarının bir temsilcisi olarak da düşünülebilir [37].

İncelediğimiz bitümlü örneklerde Se'un Fe ($r= 0.696563$) ve S ile ($r= 0.732987$) kuvvetli bir korelasyon ilişkisi gösterir (Şekil 18).

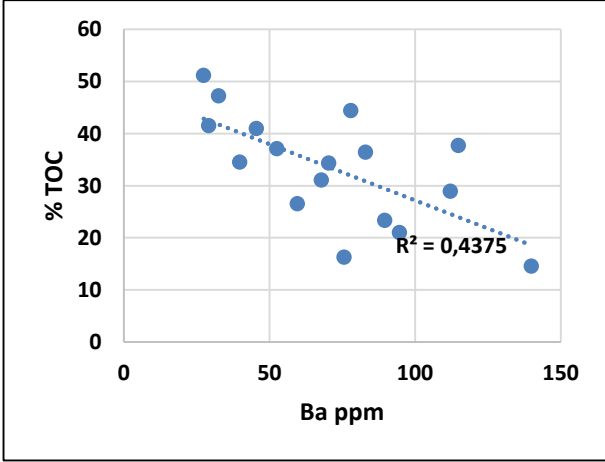
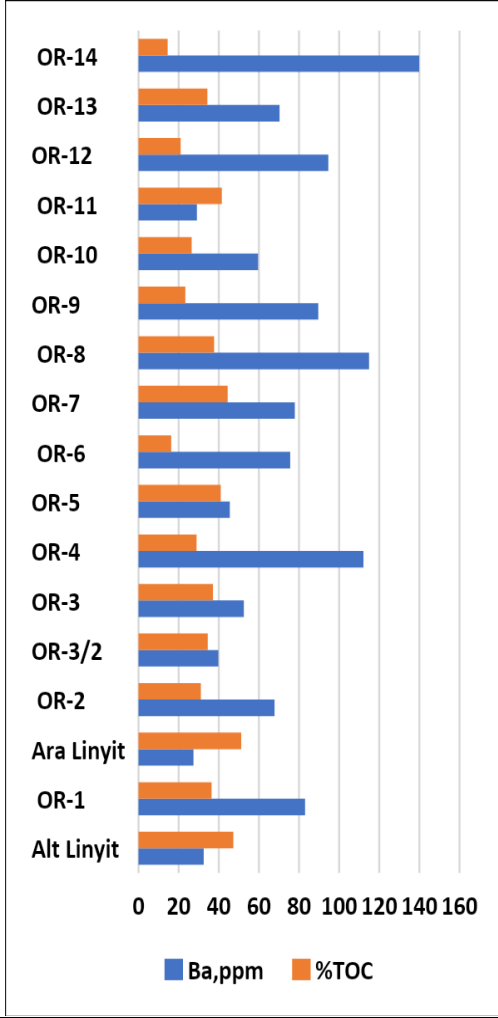


Şekil 18. Se'un Fe ve S ile korelasyon ilişkisi.

4.6 Baryum (Ba)'un jeokimyasal davranışları

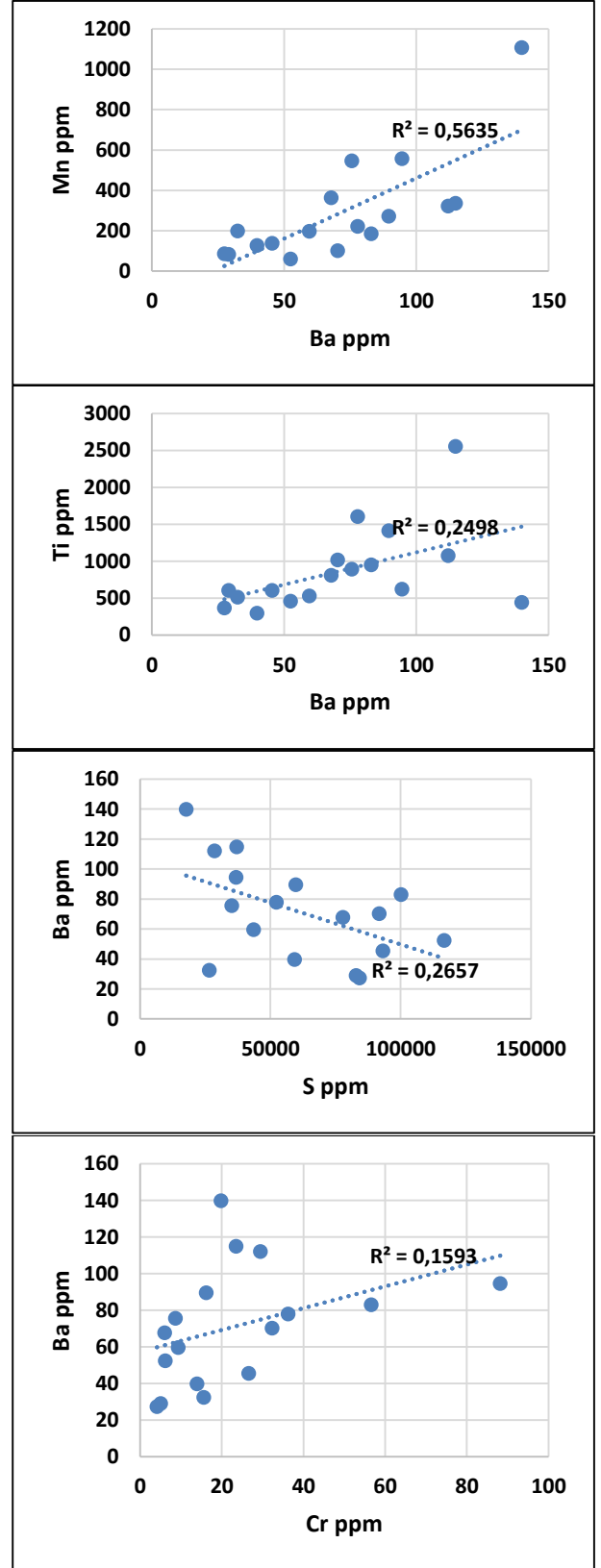
Baryum, Mn ile benzer bir davranışa sahiptir ve bu da bir paleo-üretkenlik göstergesi olarak kullanımını sınırlamaktadır [39-41]. Sucul ortamlarda P ve N gibi besin maddelerindeki zenginleşme ile paleo-üretkenliğin artışı ortak bir özelliktir. Ba'un indirgen koşullardaki organik maddece zengin olan sedimanlardaki aşırı miktarda zenginleşmesi bu tür ortamlarda çökelen Baritin ($BaSO_4$) varlığı ile kanıtlanmıştır ve bu durumun bir paleo-üretkenlik artışı nedeniyle olması kuvvetle muhtemeldir [9,38].

Çalışma alanına ait bitümlü kiltaşlarında Ba ve % TOC dağılımları Şekil 19a'da görülmektedir. İncelediğimiz bitümlü örneklerde Ba'un %TOC ile çok zayıf korelasyon ($r= -0.66142$) göstermesi Ba'un Ilgın sahası bitümlü kiltaşlarının çökeliminde organofil bir element olarak davranmadığını göstermektedir (Şekil 19b).



Şekil 19. (a) İlgın Sahası bitümlü kayaçlarında Ba (ppm) ve % TOC değerleri, (b) Ba'un %TOC ile korelasyon ilişkisi.

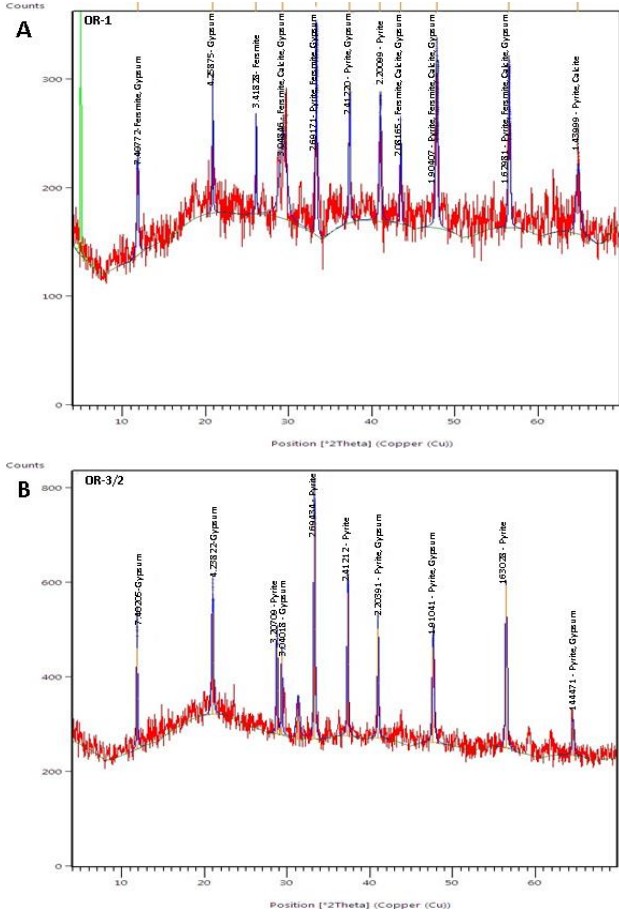
Yine, incelenen örneklerde Ba'un S ($r = -0.5154$) ile çok zayıf, Cr ($r = 0.39907$) ile zayıf, Titanyum (Ti) ($r = 0.499795$) ile orta ve Mangan (Mn) ($r = 0.750667$) ile de kuvvetli korelasyon ilişkisi bulunmaktadır (Şekil 20).



Şekil 20. Ba'un Mn,Ti,S ve Cr ile korelasyon ilişkisi.

5 Tartışma

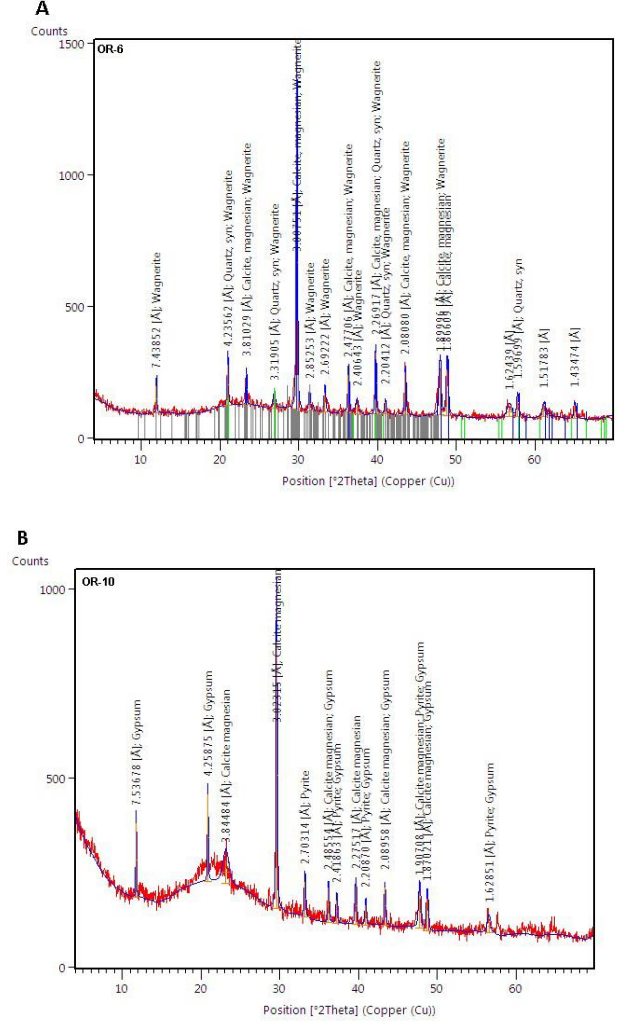
İlgün sahasındaki bitümlü kilitaşı örneklerinin Tüm kayaç XRD grafiği patern incelemelerinde pirit'in (FeS_2) hakim pikler şeklinde gözlenmesi depolanma esnasında ortamın oksijensiz, indirgen ve sülfidik anoksik koşullarda olduğunu ve sudaki çözülmüş Fe' in de pirit (FeS_2) fazında çökeldiğini göstermektedir (Şekil 21a, b; Şekil 22a,b). OR-1 numaralı örneğin tüm kayaç XRD grafiği paterninde Fersmitte: $(\text{Ca,Ce,Na}) (\text{Nb,Ta,Ti})_2 (\text{O,OH,F})_6$. Jips: $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$, Kalsit: (CaCO_3) ve Pirit: (FeS_2) mineralleri hakimdir (Şekil 21a).



Şekil 21. (a, b) OR-1 ve OR-3/2 örneklerine ait Tüm kayaç XRD grafiği paterni.

Bu mineraller çoğunlukla depolanma ortamının yarı indirgen/disoksik veya indirgen/anoksik şartlarında çöklerler. Örneğin; tortul evaporit yataklarında oluşan Jips: $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ minerali en yaygın sülfat mineralidir. Genellikle halit ve indirgeyici koşullar altında kükürt mineralleri ile ilişkilidir. OR-3/2 numaralı bitümlü kilitaşı örneğinin tüm kayaç XRD grafiği paterninde de yine Jips: $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ ve Pirit: (FeS_2) mineralleri hakimdir (Şekil 21b). Bu da OR-3/2 numaralı örneğin çökelişi esnasında depolanma ortamının indirgen sülfidik anoksik şartlarda olduğuna işaret eder. İncelenen bitümlü kilitaşlarından OR-6 ve OR-10 numaralı örneklerin tüm kayaç XRD grafiği paterninde; Wagnerite ($\text{Mg,Fe}^{2+})_2\text{PO}_4\text{F}$, Magnesian: $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$. Kuvars: (SiO_2) , Kalsit: (CaCO_3) ve

Pirit: (FeS_2) mineralleri belirlenmiştir (Şekil 22a,b). Bu durum İlgün paleo-göl havzasında P'un önemli bir besin maddesi element olduğunu ve benzer jeokimyasal şartların hakim olduğunu ifade eder.



Şekil 22. (a,b) OR-6 ve OR-10 örneklerine ait tüm kayaç XRD grafiği paterni.

Cu'nun incelenen örneklerde Fe'le olan zayıf korelasyon ilişkisi (Şekil 6) Cu'nun ortamda sülfidli bileşikler olan Kalkopirit (CuFeS_2) ve Bornit (Cu_3FeS_3) fazında da çökmediğini gösterir (Şekil 21a,b; Şekil 22a,b). Yine, Cu'nun kükürtle (S) ($r=0.216334$) zayıf korelasyon ilişkisi de (Şekil 7) Cu'nun piritte absorpsiyon veya adsorpsiyon yaparak CuS_2 şeklinde çökelişi olmadığını gibi Bakır monosülfür (CuS), Bakır (I) sulfur (Cu_2S) veya bakır sülfat (CuSO_4) şeklinde de çökmemiş olduğunu da gösterir (Şekil 21a,b; Şekil 22a,b). Cu'nun besin maddesi olan fosforla (P) ($r=-0.01539$) olan çok zayıf bir korelasyon ilişkisi de Cu'nun indirgen sülfidik şartlarda Bakır(I) fosfür (Cu_3P) şeklinde çökelişinin olmadığını göstermektedir (Şekil 21a,b; 22a,b).

Ni'nin Fe ($r=0.029961$) ve S'le ($r=-0.065$) olan çok zayıf korelasyonları bitümlü kilitaşı örneklerinin depolanması sırasında Ni'nin ortamda pentlandit $[(\text{Fe,Ni})\text{S}]$ minerali

şeklinde çökelmediğini ve ayrıca da Ni'in indirgen sülfidik ortam şartlarında Nikel sülfat (NiSO_4) şeklinde çökelişinin olmadığını göstermektedir (Şekil 21a,b; Şekil 22a,b).

Zn'nun demir (Fe) ($r = -0.14246$) ve kükürt (S) ($r = -0.13583$) ile çok zayıf bir korelasyon ilişkisinin bulunması (Şekil 13), Zn'nun indirgen sülfidik ortam şartlarında Çinko Sülfür (ZnS), Sferitit [$(\text{Zn,Fe})\text{S}$], Çinko Sülfat (ZnSO_4) veya Melanterit [$(\text{Fe,Zn})\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$] minerali şeklinde çökelmediğini gösterir (Şekil 21a,b; Şekil 22a,b). Aynı zamanda, Zn'nun Mangan (Mn) ($r = -0.16381$), Fosfor (P) ($r = 0.140809$) ve Selenyum'la (Se) ($r = 0.171402$) ile olan çok zayıf korelasyon ilişkisi (Şekil 14) Zn'nun çökelişinde mangan oksit-hidroksitlerin hiçbir etkisinin olmadığını gösterirken, yine Zn'nun, indirgen sülfidik ortam şartlarında Çinko selenid (ZnSe), Çinko fosfür (Zn_3P_2), Çinko fosfat [$\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$] ve Çinko pirofosfat ($\text{Zn}_2\text{P}_2\text{O}_7$) şeklinde de bir çökelişin de olmadığını göstermektedir (Şekil 21a,b; Şekil 22a,b).

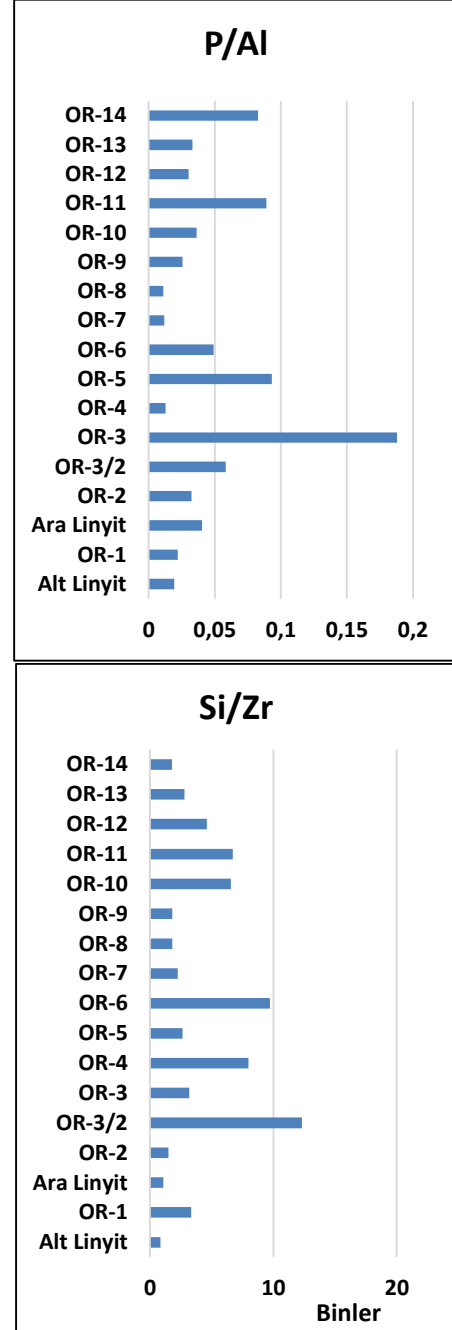
Cd'un demir (Fe) ($r = 0.379346$), kükürt (S) ($r = 0.26276$) ve Selenyum (Se) ($r = -0.03883$) ile olan zayıf ve çok zayıf korelasyon ilişkileri (Şekil 16) Cd'un sülfat indirgeme koşulları altında Kadmiyum sülfür (CdS), Kadmiyum sülfat (CdSO_4) veya Kadmiyum selenit (CdSe) şeklinde çökelişinin olmadığını göstermektedir (Şekil 7a,b; Şekil 8a,b).

Bitümlü örneklerde Se'un Fe ($r = 0.696563$) ve S ile ($r = 0.732987$) kuvvetli bir korelasyon ilişkisi göstermesi (Şekil 18) Ilgın paleo-göl havzasında, çökeltme ortamı redoks koşulunun indirgen sülfidik anoksik koşullarda olduğunu ve Se'un da çoğunlukla pirit içerisinde çökeldiğine işaret eder (Şekil 21a,b; Şekil 22 a,b).

Ba'un S ($r = -0.5154$) ile çok zayıf korelasyon ilişkisi göstermesi (Şekil 20) sülfat indirgeme koşulları altındaki indirgen çökeltme şartlarında Ba'un Baryum Sülfür (BaS), Baryum Sülfid (BaSO_3), Baryum Sülfat (BaSO_4) şeklinde çökeltmediğine de işaret eder (Şekil 21a,b; Şekil 22 a,b).

Bitümlü killi kayalarındaki organik madde zenginliği çökeltme sırasında paleo-gölün üst bölümündeki besin bolluğu ve organik üretkenlikle paralellik gösterir. Organik üretkenliği ise sudaki besin elementlerden en önemlisi olan P kontrol eder. Sucul ortamlarda fito ve zooplankton algler için besin maddesi olan P'un kaynağı kayaların ayrışmasıyla denizlere ve göllere nehirlerin taşınması yanında atmosferik taşınmadır. P bolluğundaki önemli bir azalma göl veya denizlerdeki organik üretkenlikteki azalmayla eş zamanlıdır [6,42,43]. Bitümlü kayalarındaki kavkı kaynaklı biyojenik silis ve fito ve zooplankton kaynaklı organik maddelerinin bolluğu suyun üst bölümündeki yüksek biyolojik üretkenliği gösterir [44]. Bitümlü kayalarda Si'un iki farklı kaynağı olabilir; bunlar ya kuvarsın bileşimine giren detritik kaynak veya canlıların kavkılarında kaynaklanan biyojenik Si'dir. Bu nedenle sucul ortamlardaki biyolojik üretkenliğin göstergesi olarak Si elementi kullanılabilir. Zirkon (Zr) elementi kökensel olarak karasal kaynaklı detritik bir elementtir. Bu nedenle Si/Zr oranını kullanarak Si'un kaynağı belirlenebilir. Bu açıdan değerlendirildiğinde, Si/Zr oranı ve P (toplam) değerleri arasında bir korelasyon olması durumunda, P zenginleşmesi ile birlikte Si/Zr oranlarının çakışan noktaları sudaki yüksek

biyolojik üretkenliği yansıtır. Biyojenik kökenli silis radyolaryalardan, diatomlardan ve sünger spiküllerinden türeyebilir [44-46]. Ilgın sahası bitümlü kilitaşı örneklerinde genel olarak P'un Si/Zr artış oranına uygunluk gösterdiği seviyeler, paleo-göldeki yüksek üretkenliği yansıtmaktadır (Şekil 23).

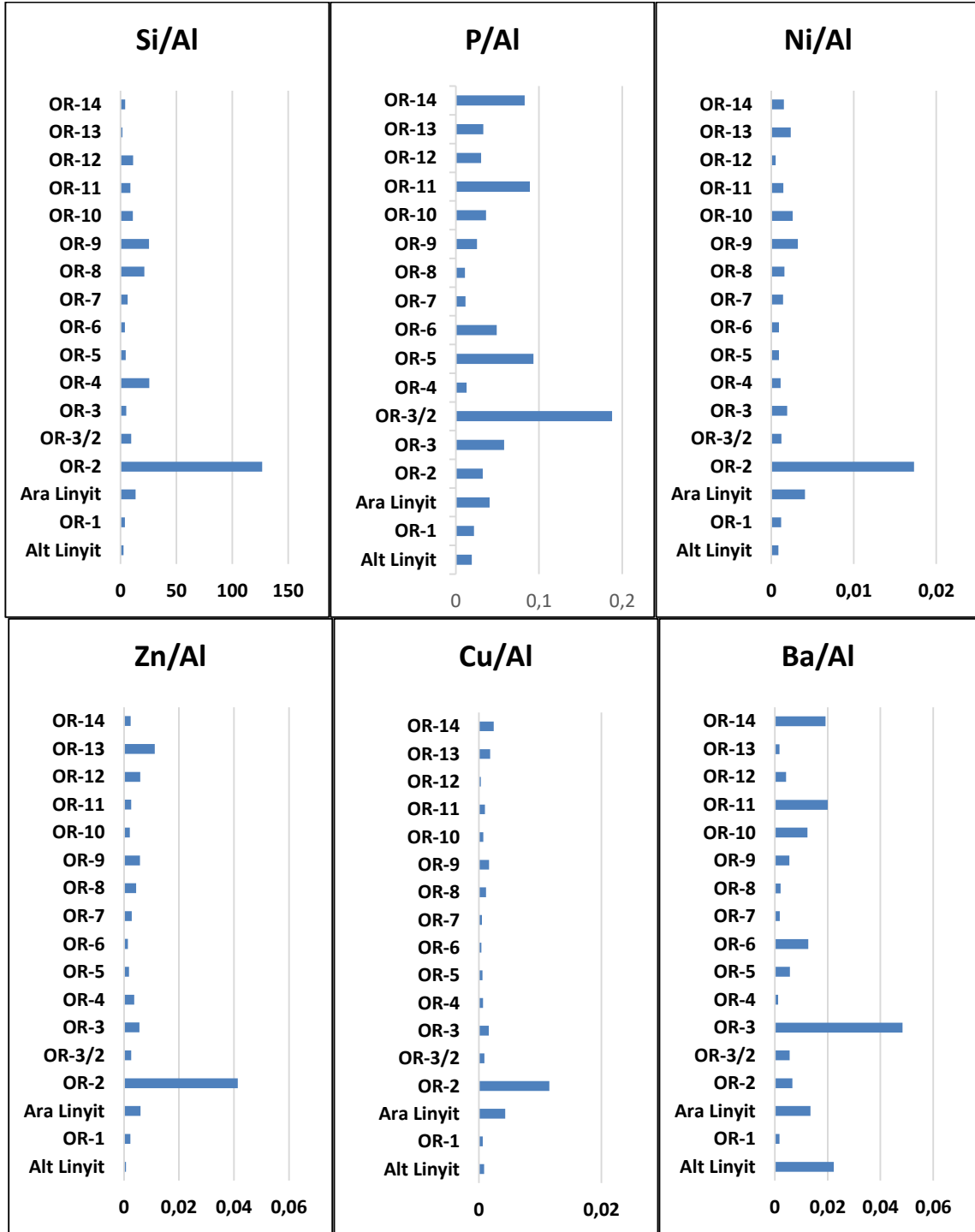


Şekil 23. Ilgın sahası bitümlü kilitaşı örneklerinde P/Al ve Si/Zr dağılımları.

Ayrıca, incelenen OR-6 ve OR-10 numaralı örneklerin tüm kayaç XRD grafiği paterlerinde de; Wagnerite ($\text{Mg,Fe}^{2+})_2\text{PO}_4\text{F}$, Magnesian: $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)$, Kuvars: (SiO_2) ve Kalsit: (CaCO_3) minerallerinin hakim olduğu belirlenmiştir (Şekil 22a,b). Bu durum Ilgın paleo-göl havzasında P'un

suda önemli bir besin maddesi element olduğunu ve P'un Wagnerite (Mg, Fe^{2+}) $_2PO_4F$ ve Magnesian: $Mg_3(PO_4)_2$ fazında çökeldiğini, bu nedenle de bu örnekte belirlenen Kuvars: (SiO_2)'ın kaynağının biyojenik kavkı kaynaklı silis olduğunu söyleyebiliriz. Bu bulguya göre, incelenen herhangi bir kayadaki Si/Zr oranı, PAAS standardına (Si/Zr: 0.31) göre zenginleşme gösterirse, bu durumda P (toplam) zenginleşmeleri Si artışıyla uyumluluk gösterir. Tersine, P'un bolluğundaki önemli bir azalma ise sucul üretkenlikteki

bir azalmaya ve Si/Zr oranındaki düşüşe karşılık gelir [24]. Ilgın sahası bitümlü kiltaşlarında hesaplanan Si/Zr oranı (1.497.0-12.321.2) ortalama 4.600.40 olup, PAAS standardına göre (Si/Zr: 0.31) çok yüksek bir değer gösterdiğinden, Ilgın havzasında paleo-gölün üst su kolonunda P'un aşırı yüksek seviyede olduğunu ve bunun sonucunda fitoplankton alglerin biyolojik üretkenliğinin de çok yüksek olduğuna, silisyumun kaynağının da biyojenik kavkı kaynaklı olduğuna işaret eder (Tablo 2).



Şekil 24. Ilgın sahası bitümlü kiltaş örneklerinde Si/Al, P/Al, Ni/Al, Zn/Al, Cu/Al ve Ba/Al, 'un dağılımları.

Tablo 2. Ilgın sahası bitümlü kiltaşlarında hesaplanan Si/Zr oranları

Örnekler	Zr, ppm	Si, ppm	Si/Zr
OR-14	31.2	55858.97	1.790.4
OR-13	50.7	141855.9	2.797.9
OR-12	33.0	152372.4	4.617.3
OR-11	16.9	113578.2	6.720.6
OR-10	30.2	197756.9	6.548.2
OR-9	48.6	87964.68	1.810.0
OR-8	73.4	132928.6	1.811.0
OR-7	50.8	114139.1	2.246.8
OR-6	23.4	227390.1	9.717.5
OR-5	17.4	45758.46	2.629.8
OR-4	36.9	294181.6	7.972.4
OR-3	14.4	177425	12.321.2
OR-3/2	20.7	65940.79	3.185.5
OR-2	32.7	48950.8	1496.966
Ara Linyit	0.00085	0.929659	1093.716
OR-1	15.0	50105.28	3.340.4
Alt Linyit	0.00299	2.556211	854.9201

Ni, Cu ve Zn elementlerinin sucul canlılar için mikro besinler olması ve organizmalarının hayatta kalmaları için gerekli olmaları nedeniyle, paleo-üretkenlik veya su sütununda birincil olarak üretilen ve daha sonra yaşam koşullarının ortadan kalkması ile kitlesel olarak gerçekleşen canlı ölümleri sonucunda çökeltme alanına taşınan organik madde miktarının temsilcisi olarak yaygın olarak kullanılırlar [9]. Baryum (Ba), barit ($BaSO_4$) olarak tortuya getirildiğinde birincil üretkenlik temsilcisi olarak kabul edilir ve barit ciddi şekilde sülfat indirgeyici anoksik koşullara duyarlıdır. Ba'un hafif bir zenginleşme gösterdiği seviyeler organofil elementler olan Cu ve Ni ile ilişkili olabilir. Artan Si bolluğu, silika-salgılayan radyolaryaya veya diyatome türü organizmaların üretkenlik koşullarının çok yüksek olduğunu ve Ni, Cu ve Ba zenginleşmesi ile de tutarlı olarak artmış olan biyojenik üretkenlikle bağlantılı olduğunu gösterir [9]. [47] çalışmasına göre biyo-besinlendirici Ni, Cu, Zn ve P elementlerinin sucul ortamlarda artması, birincil üretkenlikteki bir yükselmeyi tetikleyebilir. Bu nedenle Cu, Ni ve Zn gibi elementler, paleo-üretkenliği göstermektedir [9].

Ilgın sahası bitümlü kiltaş örneklerinde P'un (P/Al) çok yüksek olduğu seviyelerde organofil elementler olan Ni/Al, Zn/Al, Cu/Al, Ba/Al ile biyojenik kaynaklı Si/Al'un da genel olarak birbirleri ile uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 24).

6 Sonuçlar

Ilgın sahası bitümlü kiltaş örneklerinde XRD tüm kayaç grafiği paternlerinde pirit mineralinin hâkim olması paleogöl ortamının organik madde birikimi ve korunumu açısından

uygun olan O_2 'siz indirgen anoksik şartlarda olduğuna işaret eder.

Ilgın sahası bitümlü kiltaş örneklerinde %TOC'la Cu ($r=0.374331$) zayıf, Ni'in çok zayıf ($r=0.002288$), Zn'nun çok zayıf ($r=0.081467$), Cd'nin çok zayıf ($r=-0.27993$), Ba'un çok zayıf korelasyon ($r=-0.66142$) göstermesi bu elementlerin su sütunundan organik maddeye absorpsiyon şeklinde bağlanarak organometalik kompleksler şeklinde sediman içerisine taşınmasında genel olarak organik maddenin hiç bir rolünün olmadığını göstermektedir.

Çalışma alanına ait incelenen örneklerde, KI-Alt linyit ve KI-Ara linyit kömürlerinin de olduğu değerlendirilmedi Se'un %TOC ile ($r=0.404653$ orta kuvvette bir korelasyonu ($r=0.685$) söz konusudur. Ancak, incelenen örneklerden KI-Alt linyit ve KI-Ara linyit kömür örnekleri çıkartıldıktan sonra Se'un %TOC ile kuvvetli bir korelasyonu ($r=0.631929$) söz konusudur. Bu durum Ilgın sahası bitümlü kiltaşlarında Se'un algal organik madde ile ilişkili bir organofil element olduğunu ve organik maddeyle birlikte sediman içerisine taşındığına işaret eder.

İncelenen bitümlü kiltaş örneklerinde Cu'nun Fe ($r=0.220112$) ve S'le ($r=0.216334$) zayıf; Zn'nun Fe ($r=-0.14246$) ve S ($r=-0.13583$) ile çok zayıf; Cd'un Fe ($r=0.379346$) ve S ($r=0.26276$) ile zayıf; Ba'un yine, incelenen örneklerde S ($r=-0.5154$) ile çok zayıf korelasyon ilişkisi göstermesi; Cu, Zn, Cd ve Ba'un çökeltme ortamının oldukça yüksek olan sülfat indirgeme koşulları altında pirit absorpsiyon veya adsorpsiyon yaparak yada bağımsız sülfidli veya sülfatlı bileşikler şeklinde çökeltmelerinin olmadığını gösterir.

İncelenen bitümlü kayaç örneklerinde Cu'nun ($r=-0.52424$) Zn'nun ($r=-0.16381$) Mn ile çok zayıf korelasyon ilişkisi Cu'nun Zn'nun su kolonundan süpürülmesi ve sediment içerisinde zenginleşmesinde mangan oksihidroksitlerin hiçbir etkisinin olmadığını gösterir.

İncelenen bitümlü örneklerde Se'un Fe ($r=0.696563$) ve S ile ($r=0.732987$) kuvvetli bir korelasyon göstermesi Ilgın paleo-göl havzasında, çökeltme ortamı redoks koşulunun indirgen ve sülfidik olduğunu ve Se'un da çoğunlukla pirit içerisinde çökeldiğine işaret eder.

İncelenen Ilgın sahası bitümlü kiltaşlarına ait OR-6 ve OR-10 numaralı örneklerin tüm kayaç XRD grafiği paternlerinde; Wagnerite ($Mg,Fe^{2+})_2PO_4F$, Magnesian: $Mg_3(PO_4)_2$ ve Kuvars: (SiO_2), minerallerinin hakim olması, Ilgın paleogöl havzasında P'un önemli bir besin maddesi element olduğunu ve P'un Wagnerite ($Mg,Fe^{2+})_2PO_4F$ ve Magnesian: $Mg_3(PO_4)_2$ fazında çökeldiğini ayrıca Kuvars (SiO_2)'ın da biyojenik kaynaklı kuvars olduğunu göstermektedir.

Teşekkür

Yazarlar, bu makaleyi eğitim-öğretimindeki 90. yıl münasebetiyle (1934-2024) Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'ne (Ankara Jeoloji) ithaf ederler. Bu çalışmada incelenen örneklerde ana ve iz element analizleri A.Ü. YEBİM Araştırma Merkezinde ICP-OES (Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometry) model cihaz kullanılarak yapılmış olup, kendilerine teşekkür ederiz.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %8

Kaynaklar

- [1] V. F. Cherepovsky, World's Oil Shale Deposit. Moscow, Russia, Science Press, 263 pp, 1988.
- [2] R.F. Cane, The origin and formation of oil shale. In Teh Fu Yen; Chilingar, George V. (eds.). Oil Shale. Amsterdam: Elsevier. pp.1–12. 56. ISBN 978-0-444-41408-3, 1976.
- [3] J. Schieber, Evidence for high-energy events and shallow-water deposition in the Chat-tanooga Shale, Devonian, central Tennessee, USA. *Sedimentary Geology*, 93, 193–208, 1994. [https://doi.org/10.1016/037-0738\(94\)90005-1](https://doi.org/10.1016/037-0738(94)90005-1).
- [4] J.R. Dyni, Oil Shale: Encyclopedia of Energy. Survey of Energy Resources, 73-91, 2004. <https://doi.org/10.1016/B978-0080444109/50007-3>.
- [5] J.R. Dyni, Oil Shale. In Clarke, Alan W.; Trinnaman, Judy A. (eds.). Survey of energy resources (22 ed.). World Energy Council. ISBN 978-0-946121-02-1, 2010.
- [6] E.D. Ingall, R.M. Bustin, and P. Van Cappellen, Influence of water column anoxia on the burial and preservation of carbon and phosphorus in marine shales. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57, 303-316, 1993. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90433-W](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90433-W).
- [7] T.J. Algeo and S. Scheckler, Terrestrial-marine teleconnections in the Devonian: links between the evolution of land plants, weathering processes, and marine anoxic events. *Philos. Trans. R. Soc. B-Biol. Sci.*, 353(1365), 113-128, 1998. <https://doi.org/10.1098/rstb.1998.0195>.
- [8] J. Schieber, W. Zimmerle, and P. Sethi, Shales and Mudstones (vol. 1 & 2). Stuttgart, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. 1998.
- [9] N. Tribouillard, T.J. Algeo, T. Lyons, and A. Riboulleau, Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update. *Chemical Geology*, 232(1-2), 12-32, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.02.012>.
- [10] H.P. Mort, T. Adatte, K.B. Follini, G. Keller, P. Steinmann, V. Matera, Z. Berner, and D. Stüben, Phosphorus and the roles of productivity and nutrient recycling during oceanic anoxic event 2. *Geology*, 35, 483-486, 2007. <https://doi.org/10.1130/G23475A.1>.
- [11] K.W. Bruland, Trace elements in sea water. In: Riley, J.P., Chester, R. (Eds.), *Chemical Oceanography*. Academic Press, London, UK, 398p, 1983.
- [12] L. Waxman, The structure of arthropod and mollusc hemocyanins. *The Journal of Biological Chemistry* 250(10), 3796-3806, 1975. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(19\)41469-5](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(19)41469-5).
- [13] H.J. Brumsack, The trace metal content of recent organic carbon-rich sediments: Implications for Cretaceous black shale formation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 232, 344-361, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.05.011>.
- [14] H.J. Brumsack, Geochemistry of recent TOC-rich sediments from the Gulf of California and the Black Sea. *Geologische Rundschau*, 78, 851-882, 1989. <https://doi.org/10.1007/BF01829327>.
- [15] S.E. Calvert, T.F. Pedersen, Geochemistry of Recent oxic and anoxic marine sediments: implications for the geological record. *Marine Geology*, 113, 67-88, 1993.
- [16] J. B. Murphy, R. A. Strachan, R. D. Nance, K.D. Parker, and M.B. Fowler, Proto-Avalonia: A 1.2–1.0 Ga tectonothermal event and constraints on the evolution of Rodinia. *Geology*, 28, 1071–1074, 2000
- [17] T.J. Algeo and J.B. Maynard, Trace-Element Behavior and Redox Facies in Core Shales of Upper Pennsylvanian Kansas-Type Cyclothems. *Chemical Geology*, 206, 289-318, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2003.12.009>.
- [18] M. Lipinski, B. Warning, and H.J. Brumsack, Trace metal signatures of Jurassic/Cretaceous black shales from the Norwegian Shelf and the Barents Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 190, 459-475, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(02\)00619-3](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(02)00619-3).
- [19] M. Alberdi-Genolet, and E. Lafergue, Vertical variations of organic matter content in Guayuta Group (Upper Cretaceous), Interior Mountain Belt, Eastern Venezuela. *Organic Geochemistry*, 20(4), 425-436, 1993. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(93\)90091-O](https://doi.org/10.1016/0146-6380(93)90091-O).
- [20] T.J. Nameroff, L.S. Balutrier, and J.W. Murray, Suboxic trace metal geochemistry in the eastern tropical North Pacific. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(7), 1139-1158, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00843-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00843-2).
- [21] K. Loukola-Ruskeeniemi, Geochemical evidence for the hydrothermal origin of sulphur, base metals and gold in Proterozoic metamorphosed black shales, Kainuu and Outokumpu areas, Finland. *Mineralium Deposita*, 26, 152-164, 1991. <https://doi.org/10.1007/BF00195262>.
- [22] J.S. Levant, and J.W. Hosterman, Chemical and mineralogical analysis of devonian black-shale samples from Martin County, Kentucky; Carroll and Washington counties, Ohio; Wise County, Virginia; and Overton County, Tennessee, U.S.A. *Chemical Geology*, 37, 237-264, 1982. [https://doi.org/10.1016/009-2541\(82\)90081-X](https://doi.org/10.1016/009-2541(82)90081-X).
- [23] S.J. Schatzel, and B.W. Stewart, Rare Earth Element sources and modification in the Lower Kittanning coal bed, Pennsylvania; Implications for the origin of coal mineral matter and rare earth element exposure in underground mines. *International Journal of Coal Geology*, 54, 223-251, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(03\)00038-7](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(03)00038-7).
- [24] S. Paradis, Fluid Inclusion and Isotope Evidence for the Origin of the Upton Ba-Zn-Pb Deposit, Quebec Appalachians, Canada. *Economic Geology*, 99(4), 807-817, 2004. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.99.4.807>.

- [25] D.J. Mossman, B. Naggy, and D.W. Dawis, Hydrothermal alteration of organic matter in uranium ores, Elliot Lake, Canada: Implications for selected organic-rich deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(14), 3251-3259, 1993. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90538-8](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90538-8).
- [26] D.J. Mossman, F. Goodarzi, and T. Gentzis, Characterization of insoluble organic matter from the Lower Proterozoic Huronian Supergroup, Elliot Lake, Ontario. *Precambrian Research*, 61(3-4), 279-293, 1993. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(93\)90117-K](https://doi.org/10.1016/0301-9268(93)90117-K).
- [27] D.J. Mossman, Carbonaceous substances in mineral deposits: implications for geochemical exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 66(1-2), 241-247, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(99\)00015-1](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(99)00015-1)
- [28] J.R. Dyni, D.E. Anders, and R.C. Rex, Comparison of hydrotreating, Fisher assay, and Rock-Eval analyses of some world oil shales. *Proc.1989 Eastern Oil Shale Symp. Univ. Kentucky, Institute for Mining and Research*, P.270-286, 1990.
- [29] A. Kogerman, Estonian oil shale energy, when will it come to the end? *Oil Shale*, 16, 291-301, 1996. <https://doi.org/10.3176/oil.1996.4.01>.
- [30] A. Sari, K. Ismayılzada, B.Y. Pehlivanlı and F. Erol, The Relationship between Depositional Processes and Biological Productivity of Bituminous Claystones: Ilgın (Konya) Field, *General Topics in Geology and Earth Sciences 1*, Chapter II. pp. 23-40, 2023.
- [31] M.Y. Hüseyinca, ve Y. Eren, Ilgın (Konya) kuzeyinin stratigrafisi ve tektonik evrimi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23, 1-2, 2007.
- [32] A.I. Karayığit, F. Akgün, R.A. Gayer, and A. Temel, Quality, Palynology, and Paleoenvironmental Interpretation of the Ilgın Lignite, Turkey. *International Journal of Coal Geology*, 38, 219-236, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(98\)00015-9](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(98)00015-9).
- [33] M.A. Huerta-Diaz, and J.W. Morse, Pyritization of Trace Metals in Anoxic Marine Sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56, 2681-2702, 1992. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90353-K](https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)90353-K).
- [34] J.W. Morse, and G.W. Luther III, Chemical influences on trace metal-sulfide interactions in anoxic sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63, 3373-3378, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00258-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00258-6)
- [35] A.M. Piper, A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. *Transactions American Geophysical Union*, 25, 914-923, 1944. <https://doi.org/10.1029/TR025i006p00914>.
- [36] D.Z. Piper, and S.E. Calvert, A marine biogeochemical perspective on black shale deposition. *Earth Science Reviews*, 95(1-2), 63-96, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.03.001>.
- [37] G.W. Luttrell, Annotated bibliography on the geology of selenium/ U.S. Geological Survey Bulletin 1019-M Series, Washington, 1959.
- [38] J.K.B. Bishop, The barite-opal-organic carbon association in oceanic particulate matter. *Nature*, 332, 341-343, 1988. <https://doi.org/10.1038/332341a0>.
- [39] J. Dymond, E. Suess, and M. Lyle, Barium in deep-sea sediment: A geochemical proxy for paleoproductivity. *Paleoceanograph*, 7, 163-181, 1992. <https://doi.org/10.1029/92PA00181>.
- [40] M.E. Torres, H.J. Brumsack, G. Bohrman, and K.C. Emeis, Barite fronts in continental margin sediments: a new look at barium remobilization in the zone of sulfate reduction and formation of heavy barites in diagenetic fronts. *Chemical Geology*, 127, 125-139, 1996. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(95\)00090-9](https://doi.org/10.1016/0009-2541(95)00090-9).
- [41] J.W.M. McManus, W.M. Berelson, G.P. Klinkhammer, K.S. Johnson, K.H. Coale, R.F. Anderson, N. Kumar, D.J. Burdige, D.E. Hammond, H.J. Brumsack, D.C. McCorkle, and A. Rushdi, Geochemistry of barium in marine sediments: Implications for its use as a paleoceanographic proxy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62, 3453-3473, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(98\)00248-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(98)00248-8).
- [42] K.B. Föllmi, The phosphorus cycle, phosphogenesis and marine phosphate-rich deposits. *Earth Science Reviews*, 40, 55-124, 1996. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(95\)00049-6](https://doi.org/10.1016/0012-8252(95)00049-6).
- [43] M.L. Delaney, Phosphorus accumulation in marine sediments and the oceanic phosphorus cycle. *Global Biogeochemical Cycles*, 12(4), 563-572, 1998. <https://doi.org/10.1029/98GB02263>.
- [44] J.B. Comer, Facies Distribution and Hydrocarbon production potential of Woodford Shale in the Southern Midcontinent, in: B.J. Cardott, (Eds.) *Unconventional energy resources in the southern midcontinent*, 2004 Symposium, Oklahoma Geological Survey Circular, 110, 51-62, 2005.
- [45] D.W. Kirkland, R.E. Denison, D.M. Summers and J. R. Gormly, Geology and organic geochemistry of the Woodford Shale in the Criner Hills and western Arbuckle Mountains, in K. S. Johnson, B.J. Cardott, eds., *Source rocks in the southern Midcontinent*, 1990 Symposium: Oklahoma Geological Survey Circular 93, 38-69, 1992.
- [46] D.J. Over, Conodonts and the Devonian-Carboniferous boundary in the upper Woodford Shale, Arbuckle Mountains, south-central Oklahoma. *Journal of Paleontology*, 66, 293-311, 1992. <https://doi.org/10.1017/S0022336000033801>.
- [47] T.J. Algeo, and S.E. Scheckler, Terrestrial-marine teleconnections in the Devonian: Links between the evolution of land plants, weathering processes, and marine anoxic events. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B, Biological Sciences*, 353, 113-130, 1998. <https://doi.org/10.1098/rstb.1998.0195>.





Simultaneous flight control system and twist-morphing wing design of an unmanned aerial vehicle

Bir insansız hava aracının eşzamanlı uçuş kontrol sistemi ve burularak-başkalaşabilen kanat tasarımı

Yüksel Eraslan^{1,*} , Tuğrul Oktay² 

¹ İskenderun Technical University, Aerospace Engineering Department, 31200, Hatay, Türkiye

² Erciyes University, Aircraft Engineering Department, 38039, Kayseri, Türkiye

Abstract

Over the last years, the application of morphing technologies in the aircraft design field has become widespread together with developments in material technologies. In this context, this study discusses the design of an innovative twist-morphing wing on a fixed-wing unmanned aerial vehicle (UAV) aiming to obtain improvement in stall behavior (i.e. stall propagation) and autonomous flight performance. The twist-morphing wing design was designed to be capable of twisting in terms of wash-out angle between 0-degree and 6-degree. In order to have such a multidisciplinary improvement, simultaneous design approach was integrated and SPSA optimization algorithm was used. The washout angle and longitudinal and lateral PID controller coefficients were optimized to have enhancement in autonomous flight performance defined in rise time, settling time and maximum overshoot, which are related with step responses. In result, longitudinal, lateral and total performances were improved by 33.92%, 33.81% and 65.14%, respectively.

Keywords: Aircraft design, Twist-morphing, Autonomous flight performance

1 Introduction

In the field of unmanned aerial vehicles (UAVs), the requirement for enhanced maneuverability and efficiency (i.e. range and endurance) has led to motivate scientists on the development of innovative designs and control systems. In recent years, the conventional aircraft design approaches have witnessed remarkable development via the advancements in material science and technology. In that context, morphing technologies have been one of the most recent innovative applications for the field of aircraft design [1]. Materials such as shape memory alloys or polymers, piezoelectric materials, hybrid materials and electroactive polymers have paved the way for successful morphing capability in aircraft applications [2, 3]. These materials offer advantages over traditional materials in terms of lightweighting, reduced operational costs, improved durability and reliability. In addition, their adaptability and

Öz

Son yıllarda malzeme teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte hava aracı tasarımı alanında başkalaşım teknolojilerinin de uygulamaları yaygınlaşmıştır. Bu bağlamda, bu çalışmada, sabit kanatlı bir insansız hava aracı (İHA) üzerinde, perdevites davranışında (yani perdevites yayılımı) ve otonom uçuş performansında iyileşme elde etmeyi amaçlayan yenilikçi bir burularak-başkalaşabilen kanat tasarımı tartışılmaktadır. Burularak-başkalaşabilen kanat tasarımı, 0-derece ile 6-derece arasında burulabilecek şekilde tasarlanmıştır. Böylesi bir multidisipliner iyileştirme için eşzamanlı tasarım yaklaşımı sürece entegre edilmiş ve SPSA optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Burulma açısı ile boylamsal ve yanal PID kontrolcü katsayıları, birim basamak tepkisi parametreleri olan yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve maksimum aşım ile ifade edilerek otonom uçuş performansında iyileştirme sağlamak için optimize edilmiştir. Sonuç olarak, boylamsal, yanal ve toplam otonom uçuş performanslarının sırasıyla %33.92, %33.81 ve %65.14 oranında iyileştirildiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Hava aracı tasarımı, Burularak-başkalaşım, Otonom uçuş performansı

flexibility allow designers to create more streamlined and efficient aircraft shapes.

The term “morphing” refers to the ability of an aerial vehicle component to change its shape to obtain an advantage in terms of aerodynamic performance, fuel efficiency, control system performance or similar benefits for an aircraft designer. Such an application could be acted in-flight or pre-flight (on the ground) depending on which one the desired enhancement require. For fixed-wing aircraft, most morphing applications have focused on the main wing and horizontal and vertical tail surfaces, as they are critical to the stability and control of the aircraft. There are various applications in the literature relying on airfoil camber [4, 5], wing taper ratio [6] or sweep angle [7] of the wing. Twist-morphing is another application on the focus of interest aiming for adjusting the stall propagation along the wing, commonly desire to provide start at the root section to avoid stall on control surfaces. The case of the wing root

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: yuksel.eraslan@iste.edu.tr (Y. Eraslan)

Geliş / Recieved: 14.06.2024 Kabul / Accepted: 24.07.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1501418

section having a higher angle of attack than the tip section is called wash-out, while the opposite is called wash-in.

The deformation of any external component (i.e. morphing) naturally results in multidisciplinary consequences and accordingly affects stability and control issues of an aerial vehicle. Therefore, the application should be drastically investigated and the related effects must be assessed to have an improvement for a beneficial objective. Together with aerodynamical, inertial and geometrical variations due to morphing, from the control point of view, trajectory tracking qualities related with step response of the control system are important for autonomous flight performance of an aerial vehicle. These variables could be mentioned as settling time, rise time and maximum overshoot, and determine the performance of the control system.

Aforesaid multidisciplinary results of the morphing application may require a simultaneous design approach to maximize the benefits of the application. In the conventional design approach, the aerodynamic design and the control system design progresses independently for an aircraft, whereas in the modern approach they are usually integrated and evaluated concurrently. In this regard, an innovative morphing application, such as twist-morphing, on an aircraft could be simultaneously investigated with its control system to maximize the benefits for each discipline.

In the literature, there are various twist-morphing applications aiming for various performance enhancements on aircraft design. For instance, Kaygan and Ulusoy has investigated the performance of twist-morphing wing at various twist angles on Airbus A320 by using Athena Vortex Lattice method and presented the aerodynamic and stability benefits of the application [8]. Ismail et al. has studied twist-morphing on a fixed-wing micro aerial vehicle (MAV) wing and provided an enhanced lift behavior and improved performance [9]. Their assessment integrated with fluid-structure interaction (FSI) and shown the similar enhancement in drag performance. Gatto has investigated a UAV platform to obtain enhanced flight performance with active twist control (i.e. twist-morphing) and improved structural strength [10]. As a result, the glide ratio was found to be significantly improved due to a significant increase in lift and a slight increase in drag. Janett et al. have proposed an approach for morphing structures and applied on a digital span-wise twist scenario, which they also performed wind-tunnel tests [11]. Vale et al. has investigated simultaneous twist and camber morphing wing design for roll control, drag minimization and active load alleviation [12]. Their study revealed a potential in roll control flight efficiency, and load alleviation improvement. Rodrigue et al. have performed a wind-tunnel experiment on a twist-morphing UAV made from smart soft composite, and obtained an improvement on aerodynamic performance [13].

In this study, the application of an innovative twist-morphing wing design was carried out on a ZANKA-I fixed-wing UAV with the aim of achieving the desired stall propagation together with improving autonomous flight performance in both lateral and longitudinal flight. The base model was redesigned with the capability of twisting the

wing in terms of wash-out angle between 0-degree to 6-degree. The longitudinal and lateral dynamic model of the aircraft mathematically constituted and aerodynamic, inertial and geometrical variations due to the morphing application were assessed. Meanwhile, benefiting from simultaneous design approach, the SPSA optimization algorithm was integrated to improve autonomous flight performance via adjusting controller parameters (i.e. PID coefficients) and washout angle. As a novel concurrent engineering approach, it is the first time in the literature evaluating wing-twist and control system simultaneously.

2 Material and methods

The base aerial vehicle model to be investigated in this manuscript is ZANKA-I fixed-wing UAV, whose detailed information could be achieved from the study by Oktay et al. [14]. In this section, firstly, the main philosophy and constraints of the twist-morphing design will be geometrically defined. The longitudinal and lateral dynamic model of the aircraft will be examined and the methodology on investigation of geometrical, inertial and aerodynamic effects of the morphing application will be determined. Moreover, the concurrent autonomous control system and wing design optimization approach will be described, together with simultaneous perturbation stochastic approximation (SPSA).

2.1 Twist-morphing wing design

The base aerial vehicle model has no washout applied to its main wing (with 1.3-meters span), as given in Figure 1a. The twist-morphing wing is designed to have washout angle ($\alpha_{washout}$) up to 6-degrees, which resulted in higher angle of attack at root section of the main wing as given in Figure 1b. In this scenario, the washout was obtained by angle of incidence variation at root section, and tip section's geometry was fixed.

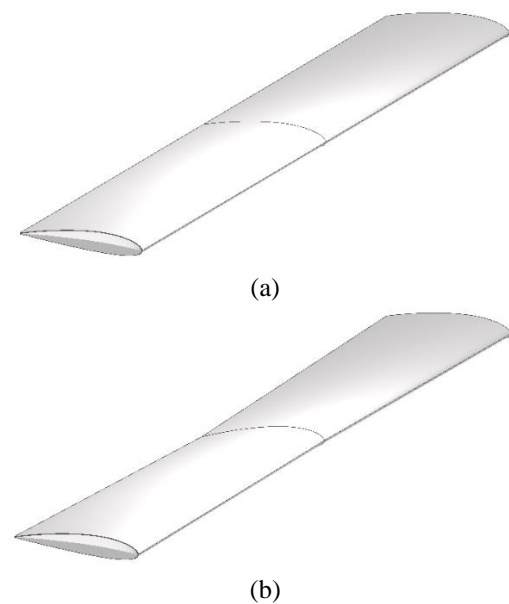


Figure 1. Twist-morphing wing design with (a) 0-degree washout angle (b) 6-degree washout angle [15]

2.2 Aircraft longitudinal and lateral dynamic model

The flight dynamics of an aerial vehicle could mathematically be defined as longitudinal and lateral dynamic models, which determines stability and control behaviors of the vehicle [16, 17].

Principally, the dynamic models include aircraft equations of motion defined as state variable representation as sets of first-order differential equations. Longitudinal and lateral dynamic models are given in Equation 1 and Equation 2, respectively. In the equations, x , y and z are the axes of aircraft frame of reference; u , v , and w , are linear velocities (m/s), p , q , and r , are angular velocities (rad/s), and θ , ϕ , and β are pitch, roll, and sideslip angles (rad), respectively. In addition, \dot{x} is the state vector, and u is the control vector, where A and B are the matrices include aircraft's stability and control derivatives, respectively. More details for the equations and included variables could be achieved from [17].

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{u} \\ \Delta \dot{w} \\ \Delta \dot{q} \\ \Delta \dot{\theta} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} X_u & X_w & 0 & -g \\ Z_u & Z_w & u_0 & 0 \\ M_u + M_{\dot{w}}Z_w & M_w + M_{\dot{w}}Z_w & M_q + M_{\dot{w}}u_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{A_{longitudinal}} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta w \\ \Delta q \\ \Delta \theta \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} X_{\delta_T} & X_{\delta_e} \\ Z_{\delta_T} & Z_{\delta_e} \\ M_{\delta_T} + M_{\dot{w}}Z_{\delta_T} & M_{\delta_e} + M_{\dot{w}}Z_{\delta_e} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_{B_{longitudinal}} \begin{bmatrix} \Delta \delta_T \\ \Delta \delta_e \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\beta} \\ \Delta \dot{p} \\ \Delta \dot{r} \\ \Delta \dot{\phi} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{Y\beta}{u_0} & \frac{Yp}{u_0} & \frac{-g \cos(\theta_0)}{u_0} & -(1-\frac{Yr}{u_0}) \\ L\beta^* + \frac{I_{xz}}{I_{xx}}N\beta^* & Lp^* + \frac{I_{xz}}{I_{xx}}Np^* & Lr^* + \frac{I_{xz}}{I_{xx}}Nr^* & 0 \\ Nv^* + \frac{I_{xz}}{I_{zz}}Lv^* & Np^* + \frac{I_{xz}}{I_{zz}}Lp^* & Nr^* + \frac{I_{xz}}{I_{zz}}Lr^* & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_{A_{lateral}} \begin{bmatrix} \Delta \beta \\ \Delta p \\ \Delta r \\ \Delta \phi \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & \frac{Y\delta_r}{u_0} \\ L\delta_a^* + \frac{I_{xz}}{I_{xx}}N\delta_a^* & L\delta_r^* + \frac{I_{xz}}{I_{xx}}N\delta_r^* \\ N\delta_a^* + \frac{I_{xz}}{I_{zz}}L\delta_a^* & N\delta_r^* + \frac{I_{xz}}{I_{zz}}L\delta_r^* \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_{B_{lateral}} \begin{bmatrix} \Delta \delta_a \\ \Delta \delta_r \end{bmatrix} \quad (2)$$

The variables of the dynamic models were dramatically affected from geometrical, aerodynamic and inertial variations. Thus, the variations driven by twist-morphing application should be investigated. Geometrical point of view, within such an application, occurs only angular change, and aspect ratio and span of the wing stay constant. In addition, the inertial and aerodynamic assessment was numerically carried out in our previous conference paper and the obtained resultant values for various washout angles are given in Table 1 [15]. In order to obtain extended results for every washout angle between 0-

degree to 6-degree, a Nonlinear Least Squares (NLS) regression algorithm is also integrated [18].

2.3 Autonomous flight control system

The autonomous flight control system of ZANKA-I UAV has been presented in a previous study with conventional hierarchical structure composed of 6 PID (proportional, integral, derivative) controllers, where detailed information about the controller could be achieved from et al. [19]. The longitudinal and lateral controller PID coefficients of the system, which are proportional (k_p), integral (k_i), and derivative (k_d) dramatically known to affect the trajectory tracking performance of the aerial vehicle. For instance, the increasing values of k_r and k_l are known to result increment in maximum overshoot, while reduction in rise time. On the other hand, increasing value of k_d is known to result reduction in both maximum overshoot and settling time [20]. Therefore, these coefficients should be appropriately tuned during or pre-flight to obtain improved flight performance.

2.4 Simultaneous perturbation stochastic approximation (SPSA)

The flight dynamics (i.e. performance, stability and control) of an aircraft is a complex issue, as revealed in Equation 1 and Equation 2, commonly to be optimized aiming for various performance-based objectives. In that context, stochastic optimization methods have known to be flexible, adaptable and offering robustness to noise, on such complex problems rather than deterministic optimization methods (such as gradient-based methods, linear or quadratic programming, convex optimization etc.).

In this paper, the objective is to improve autonomous trajectory tracking performance of the aerial vehicle by means of 7 parameters, which are longitudinal and lateral PID coefficients together with wing washout angle. For that purpose, SPSA algorithm is preferred to be used as a gradient-free stochastic optimization algorithm that uses few numbers of recursion for loss-function evaluation. Theoretical background and detailed information about the SPSA methodology could be achieved from [21, 22].

In order to construct the cost-indexes, the longitudinal and lateral trajectory tracking performances of the aerial vehicle have defined in terms of rise time (T_{rt}), settling time (T_{st}) and maximum overshoot (OS). Longitudinal cost-index ($J_{longitudinal}$) and lateral cost-index ($J_{lateral}$) have summed to obtain total cost-index (J_{total}). Lateral cost-index is multiplied by weighing value of 100 to have similar impact on total cost-index as shown in Equation 3 and Equation 4.

$$J_{total} = J_{longitudinal} + J_{lateral} * (100) \quad (3)$$

$$J_{total} = (T_{rt} + T_{st} + OS)_{longitudinal} + (T_{rt} + T_{st} + OS)_{lateral} * (100) \quad (4)$$

The objective in our optimization case is to minimize the total cost-index to obtain improved trajectory tracking

performances for both 5-degree pitching and 5-degree roll flight scenarios at 16.66 m/s airspeed at sea-level conditions.

3 Results and discussions

3.1 Aerodynamic and inertial variations

The aerodynamic and inertial variations of the aerial vehicle obtained from 0-degree to 6-degree washout angles with 2-degree intervals as given in Table 1 [15].

Table 1. Aerodynamic and inertial variations with respect to washout angle

$\alpha_{washout}$	0°	2°	4°	6°
$I_{xx} (kgm^2)$	0.09878	0.09875	0.09871	0.09863
$I_{yy} (kgm^2)$	0.14219	0.14218	0.14199	0.14199
$I_{zz} (kgm^2)$	0.22971	0.22968	0.22962	0.22940
$I_{xz} (kgm^2)$	0.01276	0.0084	0.0040	0.0003
C_{D0}	0.01322	0.01107	0.00952	0.00864
C_{L0}	0.6494	0.4603	0.4256	0.3140
C_{La}	4.824	4.816	4.835	4.850
C_{Da}	0.1	0.08811	0.07551	0.06761
e	1.033	1.057	1.031	0.856

It is clear from the results that, zero-lift drag coefficient (C_{D0}) has been decreasing for whole washout angle interval, where reference lift coefficient (C_{L0}) has the similar tendency. Lift curve slope (C_{La}) and Oswald efficiency factor (e) point of view, washout application has been resulted in a polynomial behavior, which decreased/increased up to 2-degrees and increased/decreased at higher angles of washout. Drag curve slope (C_{Da}) point of view, completely decreasing trend was found for increasing washout angle applications.

Inertial parameters of the vehicle also varied with the twist-morphing application, where I_{xx} , I_{zz} and I_{xz} has a decreasing trend with increasing values of washout angle. I_{yy} has found to vary similar with lift-curve slope and has polynomial behavior.

The results of such a complex behavior of foresaid parameters with twist-morphing application dramatically affects the dynamic model of the vehicle given in Equation 1 and Equation 2. The effects of the variation in washout angle on stability and control derivatives of the aerial vehicle was presented in our previous conference paper and could be achieved from [15].

3.2 SPSA optimization

The nonlinear variation in emphasized parameters dramatically affects the performance of longitudinal and lateral dynamic models, and should be optimized with an appropriate methodology, which is determined as SPSA in this study. In that context, the simultaneous design approach comes to the fore and the estimation of the most proper washout angle together with longitudinal and lateral PID coefficients is essential. In summary, the application refers to concurrent design of aircraft wing and control system. In this regard, the obtained aerodynamic and inertial data used for regression analyses and expanded via NLS algorithm in MATLAB environment and linked to constituted aircraft dynamic models.

The SPSA algorithm was adjusted to optimize both wing design and control system to obtain a successful trajectory tracking in terms of 5-degree pitching motion and 5-degree rolling motion. Initial values of PID coefficients and washout angle, which the base model have, are 50, 5, 50 and 0-degree, respectively. Correspondingly, the initial values for longitudinal, lateral and total costs are given in Table 2.

The results of the optimization using SPSA were found to be converged after a few iterations, as expected, shown in Figure 2. The decrement in cost index implies improvement in trajectory tracking qualities defined in the sum of maximum overshoot, rise time, and settling time in Equation 4. Accordingly, trajectory tracking performance point of view, longitudinal and lateral flight performances were found to increase by 33.92% and 33.81% with respect to the initial design, respectively. Moreover, the total flight performance of the aircraft was found to increase by 65.14% as summarized in Table 2.

Table 2. Base and optimized values of longitudinal, lateral and total costs

Variable	Initial value	Optimized value	Difference
$J_{longitudinal}$	0.6634	0.4383	-33.92%
$J_{lateral}$	0.000364	0.000240	-33.81%
J_{total}	1.326	0.4624	-65.14%

In Table 3, the initial and optimized values of PID coefficients and washout angle are given. The results shown the tendency of the algorithm to decrease the proportional and integral coefficients and increase the derivative coefficient for both longitudinal and lateral cases. Correspondingly, the change in such parameters has an effect on trajectory tracking parameters of rise time, settling time and overshoot, whose initial and optimized values were summarized in Table 4. For lateral case, maximum overshoot has found not to be changed as it was initially having optimal value. In addition, settling time has found to be considerably decreased due by means of decrement in integral coefficient. For longitudinal case, the increase in the derivative coefficient has found to be resulted in a substantial decrement of maximum overshoot, as expected. Also settling time has found to be increased, and maximum overshoot has found to be decreased due to the dramatical increment in derivative coefficient.

Table 3. Base and optimized values of PID coefficients

Variable	Initial value	Optimized value
$k_{Plongitudinal}$	50	27.50
$k_{Ilongitudinal}$	5	2.51
$k_{Dlongitudinal}$	50	74.88
$k_{Plateral}$	50	27.38
$k_{Ilateral}$	5	2.51
$k_{Dlateral}$	50	74.99
Washout angle	0 (degree)	2.2 (degree)

In Figure 3, the variation of longitudinal and lateral PID coefficients with respect to iteration index were presented, which clearly represents a convergence after few iterations.

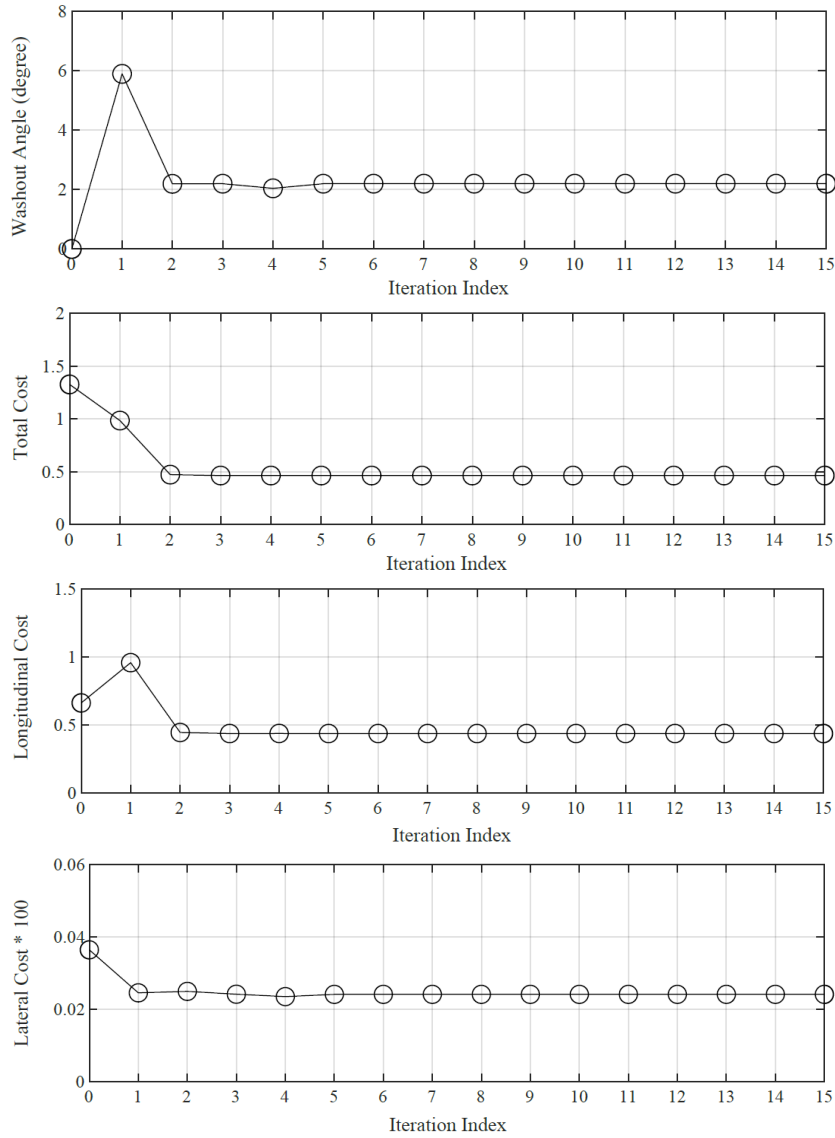


Figure 2. The convergence of longitudinal, lateral and total costs and washout angle with iteration index

Table 4. Base and optimized values of trajectory tracking parameters and percentage difference

Variable	Initial value	Optimized value	Difference
$Trt_{longitudinal}$	0.04037	0.02495	-38.19%
$TSt_{longitudinal}$	0.33329	0.43751	+31.27%
$OS_{longitudinal}$	0.28974	0	-100%
$Trt_{lateral}$	0.0001300	0.0000862	-33.65%
$TSt_{lateral}$	0.0002341	0.0001547	-33.9%
$OS_{lateral}$	0	0	-

In summary, the only loss obtained among the parameters has found as the longitudinal settling time, which has found to be increased by 31.27%. Nonetheless, in total, the trajectory tracking performance of the vehicle has been found to be increased by 65.14%, which means a remarkable improvement. Geometrical point of view, the washout angle of the twist-morphing main wing has found to be applied as 2.2 degrees that provides a desired stall propagation beginning from the root section.

Aerodynamic point of view, drag coefficient of an aircraft is the sum of induced (C_{Di}) and zero-lift drag coefficients, and the induced drag could be achieved from Equation 5. As the aspect ratio (AR) of the wing is constant, the decrement in lift coefficient and increment in Oswald efficiency results a great decrement in induced drag of the vehicle.

$$C_{D_i} = \frac{C_L^2}{\pi e AR} \quad (5)$$

On the other hand, the decrement in aerodynamic performance (L/D) results a decrease in range (R) of the aircraft, as given in Equation 6, where η is the propulsive efficiency, C is the specific fuel consumption and W_0 and W_1 are the initial and final weights of the aircraft, respectively.

$$R = \frac{\eta C_L}{C C_D} \ln \left(\frac{W_0}{W_1} \right) \quad (6)$$

Stall speed of the vehicle stays constant with the change in washout angle as the maximum lift coefficient and wing area (S) is constant, as given in Equation 7.

$$V_{STALL} = \sqrt{2\rho S C_{L_{MAX}}} \quad (7)$$

Flight performance point of view, the takeoff distance of the vehicle has not been affected remarkably, where the propulsive forces are dominant than aerodynamic forces. In case of landing, the landing distance could be slightly increased with respect to the decrement in drag force. In cruise flight, decrement in lift coefficient could require to cruise at a higher airspeed to preserve the flight altitude,

where weight force of the vehicle should be equal to produced lift force as given in Equation 8.

$$W = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_L \quad (8)$$

4 Conclusions

In this paper, an innovative twist-morphing wing design has been applied on a fixed-wing unmanned aerial vehicle to obtain an improvement in autonomous flight performance (i.e. trajectory tracking performance). The main wing was redesigned with the capability of morphing to have a washout angle between 0-degree to 6-degree, which differs root and tip sections of the wing to adjust the stall propagation as desired. In that context, the simultaneous design approach was applied for wing and control system design to obtain trajectory tracking performance enhancement.

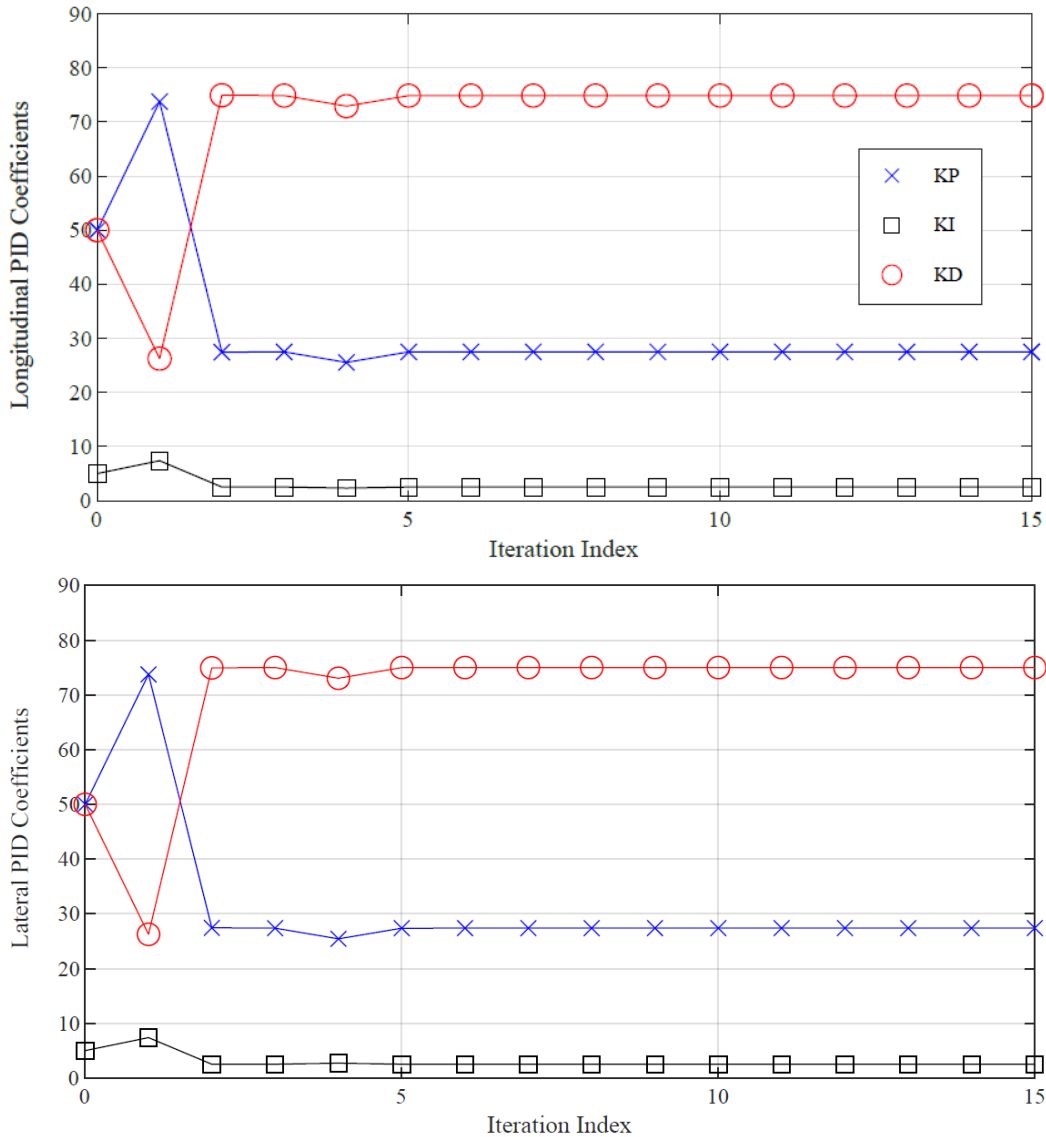


Figure 3. The convergence of longitudinal and lateral PID coefficients with iteration index

For that purpose, the constituted dynamic models of the vehicle integrated into the SPSA optimization algorithm, which is empowered with conduction of NLS algorithm. Control system parameters (i.e. PID coefficients) and washout angle (i.e. totally 7 parameters) were estimated by the algorithm aiming for improvement in trajectory tracking performances defined in terms of rise time, settling time and maximum overshoot for both longitudinal and lateral flights.

The simultaneous design approach has resulted in an improvement in total performance by 65.14%, while 33.92% and 33.81% in longitudinal and lateral trajectory tracking performances, respectively. Consequently, initial main wing geometry has redesigned to have 2.2-degree washout angle and improved also in terms of stall propagation. In conclusion, this study has clearly shown the potential behind the simultaneous design approach on aircraft design processes and various morphing ideas.

As a future work, the proposed concurrent design methodology could be applied not only for control system and aerodynamic designs, it could be useful for various disciplines such as propulsion and structural design issues. The combination of different disciplines could be benefited for aircraft conceptual and preliminary designs and pave the way for developing novel applications in aircraft design.

Nomenclature

x, y, z - positions along x, y and z axes;
 u, v, w - linear velocities along $x, y,$ and z axes;
 p, q, r - roll, pitch and yaw rate;
 X, Y, Z - forces along $x, y,$ and z axes;
 L, M, N - moments about $x, y,$ and z axes;
 I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} - moments of inertia about $x, y,$ and z axes;
 I_{xz} - moment of inertia about xz -plane;
 $\delta_r, \delta_e, \delta_a$ - deflection of rudder, elevator and aileron;
 $\psi, \theta, \phi, \beta$ - yaw, pitch, roll and sideslip angles.

Acknowledgment

A part of this paper is presented in Avrasya 10th International Conference on Applied Sciences on May 2-5 2024, Tbilisi, Georgia [15].

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): %17

References

- [1] S. Ameduri and A. Concilio, Morphing wings review: Aims, challenges, and current open issues of a technology. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 237(18), 4112-4130, 2023. <https://doi.org/10.1177/0954406220944423>
- [2] K. Sharma and G. Srinivas, Flying smart: Smart materials used in aviation industry, Materials Today: Proceedings, 27, 244-250, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.115>
- [3] R. M. Ajaj, M. S. Parancheerivilakkathil, M. Amoozgar, M. I. Friswell and W. J. Cantwell, Recent developments in the aeroelasticity of morphing aircraft, Progress in Aerospace Sciences, 120, 100682, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2020.100682>
- [4] A. Dharmdas, A.Y. Patil, A. Baig, O.Z. Hosmani, S.N. Mathad, M.B. Patil, R. Kumar, B.B. Kotturshettar and I.M.R. Fattah, An Experimental and simulation study of the active camber morphing concept on airfoils using bio-inspired structures. Biomimetics, 8(2), 251, 2023. <https://doi.org/10.3390/biomimetics8020251>
- [5] B.W. Jo and T. Majid, Enhanced range and endurance evaluation of a camber morphing wing aircraft. Biomimetics, 8(1), 34, 2023. <https://doi.org/10.3390/biomimetics8010034>
- [6] T. Oktay and Y. Eraslan, Impacts of tapered wingtip on lateral-directional stability coefficients of a morphing fixed-wing UAV. The Black Sea Journal of Sciences, 13(4), 1540-1551, 2023. <https://doi.org/10.31466/kfbd.1309152>
- [7] L. Gao, Y. Zhu, X. Zang, J. Zhang, B. Chen, L. Li and J. Zhao, Dynamic analysis and experiment of multiple variable sweep wings on a tandem-wing MAV. Drones, 7(9), 552, 2023. <https://doi.org/10.3390/drones7090552>
- [8] E. Kaygan and C. Ulusoy, Effectiveness of twist morphing wing on aerodynamic performance and control of an aircraft. Journal of Aviation, 2(2), 77-86, 2018. <https://doi.org/10.30518/jav.482507>
- [9] N. I. Ismail, M.A. Tasin, H. Sharudin, M.H. Basri, S.C. Mat, H. Yusoff and R.E.M. Nasir, Computational aerodynamic investigations on wash out twist morphing MAV wings. Evergreen, 9(4), 1090-1102, 2022. <https://doi.org/10.5109/6625721>
- [10] A. Gatto, Development of a morphing UAV for optimal multi-segment mission performance. The Aeronautical Journal, 127(1314), 1320-1352, 2023. <https://doi.org/10.1017/aer.2022.99>
- [11] B. Jenett, S. Calisch, D. Cellucci, N. Cramer, N. Gershenfeld, S. Swei and K.C. Cheung, Digital morphing wing: active wing shaping concept using composite lattice-based cellular structures. Soft robotics, 4(1), 33-48, 2017. <https://doi.org/10.1089/soro.2016.0032>
- [12] J. Lobo do Vale, J. Raffaelli and A. Suleman, Experimental validation and evaluation of a coupled twist-camber morphing wing concept. Applied Sciences, 11(22), 10631, 2021. <https://doi.org/10.3390/app112210631>
- [13] H. Rodrigue, S. Cho, M.W. Han, B. Bhandari, J.E. Shim and S.H. Ahn, Effect of twist morphing wing segment on aerodynamic performance of UAV. Journal of Mechanical Science and Technology, 30, 229-236, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12206-015-1226-3>
- [14] T. Oktay, M. Konar, M. Onay, M. Aydin and M.A. Mohamed, Simultaneous small UAV and autopilot system design. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 88(6), 818-834, 2016. <https://doi.org/10.1108/AEAT-04-2015-0097>
- [15] Y. Eraslan and T. Oktay, Stability assessment of unmanned aerial vehicle with twist-morphing wing.

- Avrasya 10th International Conference on Applied Sciences, p. 88-95, Tblisi, Georgia, May 2-5 2024.
- [16] J. Roskam, *Airplane Flight Dynamics and Automatic Flight Controls*. DARcorporation, USA, 1998.
- [17] R.C. Nelson, *Flight Stability and Automatic Control*. WCB/McGraw Hill, New York, 1998.
- [18] T. Oktay and Y. Eraslan, Autonomous flight performance optimization of fixed-wing unmanned aerial vehicle with morphing wingtip. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 96(3), 475-482, 2024. <https://doi.org/10.1108/AEAT-09-2022-0262>
- [19] Y. Eraslan, and T. Oktay, Multidisciplinary Performance Enhancement on a Fixed-wing Unmanned Aerial Vehicle via Simultaneous Morphing Wing and Control System Design. *Information Technology and Control*, 52(4), 833-848, 2023. <https://doi.org/10.5755/j01.itc.52.4.33527>
- [20] A. Baharuddin and M.A.M. Basri, Trajectory Tracking of a quadcopter UAV using PID controller. *Elektrika-Journal of Electrical Engineering*, 22(2), 14-21, 2023. <https://doi.org/10.11113/elektrika.v22n2.440>
- [21] J.C. Spall, Multivariate stochastic approximation using a simultaneous perturbation gradient approximation. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 37, 1992.
- [22] I. J. Wang, and J.C. Spall, Stochastic optimisation with inequality constraints using simultaneous perturbations and penalty functions. *International Journal of Control*, 81(8), 1232-1238, 2008. <https://doi.org/10.1080/00207170701611123>





A design template for globally stable nonlinear oscillators with multiple dynamics

Çoklu dinamiklere sahip global kararlı lineer olmayan osilatörler için bir tasarım şablonu

İsmail Öztürk^{1,*} 

¹ Amasya University, Department of Electrical and Electronics Engineering, 05100, Amasya, Türkiye

Abstract

In this study, a template is proposed for designing ordinary differential equation-based nonlinear oscillators. The template is a two-dimensional system with two control parameters and an energy function. By choosing the appropriate energy function, it is possible to obtain globally stable systems. These systems can be a gradient system, a Hamiltonian system, or a system with a stable limit cycle depending on the choice of control parameters. Hamiltonian and limit cycle cases can be used as a nonlinear oscillator for various applications. An example system is demonstrated by choosing a simple energy function and the obtained system is simulated to verify its dynamics. Hardware verification of the simulated system is performed with a field programmable gate array (FPGA) implementation.

Keywords: Nonlinear oscillator, Gradient system, Hamiltonian system, Limit cycle, FPGA

1 Introduction

Nonlinear oscillators play a fundamental part in many research areas and disciplines including engineering, robotics, chemistry, biology, physics, and mechanics [1–8]. For example, the well-known Van der Pol oscillator is used in many electrical circuits as a self-excitable or forced oscillator [9, 10]. Oscillators like Van der Pol fall into the category of oscillators having a stable limit cycle [11]. A stable limit cycle is a periodic orbit that attracts nearby orbits causing fixed amplitude oscillations immune to external perturbations. Oscillators with limit cycles are widely used to model biological neuron models and many neuromorphic applications rely on them [12–15]. Central pattern generators and spiking neural networks are such applications [16, 17]. Besides neuronal activity, limit cycle oscillators are also used to model other biological phenomena like heartbeat signals and glycolysis [11, 18].

However, the design and analysis of limit cycles are not often easy due to their nonlinear properties. For example, the set of initial conditions that are attracted to the limit cycle is called the basin of attraction, and it is not always possible to find the basin of attraction explicitly. Most of the time, numerical methods are utilized to approximate the basin of

Öz

Bu çalışmada adi diferansiyel denklem tabanlı lineer olmayan osilatörlerin tasarımı için bir şablon önerilmektedir. Önerilen şablon iki adet kontrol parametresine ve bir adet enerji fonksiyonuna sahip iki boyutlu bir sistemdir. Uygun enerji fonksiyonu seçimi ile global olarak kararlı sistemler elde etmek mümkün olmaktadır. Bu sistemler farklı kontrol parametreleri için gradyan sistem, Hamilton sistemi veya kararlı bir limit çövrime sahip bir sistem olabilmektedir. Hamilton sistemi ve limit çevrim durumlarında sistem farklı uygulamalar için lineer olmayan osilatör olarak kullanılabilir. Basit bir enerji fonksiyonu seçimiyle örnek bir sistem elde edilip sistemin dinamikleri simülasyonlarla doğrulanmıştır. Simülasyonu yapılan sistemin donanımsal doğrulanması ise alanda programlanabilir kapı dizisi (FPGA) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Lineer olmayan osilatör, Gradyan sistem, Hamilton sistemi, Limit çevrim, FPGA

attraction [19]. Knowing the basin of attraction is crucial for applications relying on limit cycle oscillators because initial conditions outside the basin of attraction or excessive external perturbations cause unwanted behavior instead of stable oscillations.

A limit cycle is called globally stable if its basin of attraction is the whole domain of the system (excluding isolated equilibria). Due to this property, globally stable limit cycles always produce stable oscillations regardless of the initial conditions or external perturbations. Therefore, globally stable limit cycle oscillators are more desirable for real-world applications. Again, it is not an easy task to design and analyze a globally stable limit cycle attractor.

One other type of nonlinear oscillators falls into the category of Hamiltonian systems [20]. Unlike limit cycle oscillators having a single periodic orbit, the phase space of Hamiltonian systems is full of different periodic orbits. Moreover, unlike a limit cycle, Hamiltonian orbits do not attract nearby orbits. In practice, a limit cycle oscillator produces a fixed amplitude and fixed frequency oscillation regardless of the initial condition. On the other hand, a Hamiltonian oscillator produces oscillations with different amplitude and frequency depending on the initial conditions.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ismail.ozturk@amasya.edu.tr (İ. Öztürk)

Geliş / Received: 25.03.2024 Kabul / Accepted: 25.07.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1458253

They can be used in applications or models where different oscillations are needed for different initial conditions. Simple harmonic oscillators are examples of Hamiltonian systems.

Another type of nonlinear systems is called gradient systems [21]. Unlike limit cycle systems or Hamiltonian systems, such systems do not allow the existence of any periodic orbits within their domain. Instead, orbits settle into one of the equilibria. Even though the nature of these systems does not allow periodic orbits, such non-oscillatory behavior is still desired in applications like nonlinear control [22].

Due to the wide application areas of nonlinear oscillators, researchers from various backgrounds may want to utilize a limit cycle oscillator, a Hamiltonian system, or a gradient system depending on their needs. However, as mentioned before, it is hard to analyze these systems especially if the researcher is not specialized in the mathematical analysis of dynamical systems. Therefore, researchers from different backgrounds may not properly find and use the correct system.

In this paper, a design template is presented to obtain two-dimensional ordinary differential equation-based systems that are capable of exhibiting all aforementioned behaviors. The obtained system can be a gradient system, a Hamiltonian system, or a system with a limit cycle by changing only two parameter values. Moreover, the single equilibrium of the gradient system and the limit cycle are globally stable, meaning that there is no need to calculate the basin of attractions. Using this template, researchers from different backgrounds may easily obtain gradient, Hamiltonian, and limit cycle behaviors on a single system without worrying about analytical details. Also, a field programmable gate array (FPGA) implementation is given to demonstrate the applicability of the obtained systems.

The organization of the paper is as follows. In Section 2, the design template is introduced, and an example system is obtained using this template. Afterward, the numerical simulations for different behaviors of the obtained system are given. In Section 3, the FPGA implementation details of the obtained system are presented. Finally, the conclusions are given in Section 4.

2 The design template and the numerical simulations

The equations of the design template are given in Equation (1).

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -D_1E + \mu(D_1E + D_2E) + ay \\ \dot{y} &= -D_2E + \mu(D_2E - D_1E) - ax\end{aligned}\quad (1)$$

Here, $\mu \in [0,1]$ and $a \in \mathbb{R}$ are the parameter values. D_1 represents partial derivative with respect to x ; D_2 represents partial derivative with respect to y . E is the abbreviation for $E(x, y)$ such that $E: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ is a function which represents the energy of the solutions. Even though this energy function may not have actual physical meaning with potential and kinetic parts, it is convenient for analyzing the global behavior of the solutions. If $\dot{E} < 0$, it means that the solutions lose energy. In other terms, solutions must settle into an equilibrium. If $\dot{E} = 0$, it means that the solutions

preserve energy which indicates the existence of periodic solutions.

The function E must be chosen according to the following conditions.

- (1) E should have continuous partial derivatives.
- (2) E should be non-negative ($E \geq 0$).
- (3) $E = 0$ if and only if $x \in L$ or x is an equilibrium point. Here, L is a closed curve and it should also depend on parameter a .
- (4) Closed curve L should only exist for $a > 0$.
- (5) $D_1E \cdot ay - D_2E \cdot ax \leq 0$ for $a \in \mathbb{R}$.

As long as these conditions are satisfied, any function can be used to obtain a system with multiple dynamics. For the obtained systems, parameter μ introduces rotations to the phase plane as its value increases from zero. For $\mu = 1$, the systems become Hamiltonian regardless of the value of parameter a . On the other hand, parameter a introduces a limit cycle to the systems or makes the systems gradient. For $a < 0$, the systems are gradient, and the solutions settle into a globally stable equilibrium. For $a > 0$, the systems have a globally stable limit cycle. For $a = 0$, the system undergoes bifurcation for the appearance of the limit cycle.

These statements can be proven mathematically by investigating the \dot{E} value in Equation (2).

$$\frac{dE}{dt} = D_1E \cdot \dot{x} + D_2E \cdot \dot{y} \quad (2)$$

For $0 \leq \mu < 1$, placing \dot{x} and \dot{y} expressions of Equation (1) into the Equation (2) yields $\dot{E} < 0$. This means that the solutions should asymptotically converge to the equilibrium if L does not exist ($a < 0$). If L exists ($a > 0$), then the solutions asymptotically converge to the closed curve L . Since closed curve L is not a set of equilibria of the system in Equation (1), the L should act as a stable limit cycle.

For $\mu = 1$, placing \dot{x} and \dot{y} into the Equation (2) yields $\dot{E} = 0$ making the system Hamiltonian. As a special case, for $\mu = 1$ and $a = 0$, the function E is exactly the same with the Hamiltonian function.

2.1 An example system

The simplest choice of the function E is given in Equation (3).

$$E(x, y) = (x^2 + y^2 - a)^2 \quad (3)$$

It is trivial to show that this function satisfies conditions (1) and (2). Notice that $E = 0$ if and only if $x^2 + y^2 - a = 0$. This is the equation of a circle with radius a . Therefore, the closed curve L of the function E corresponds to a circle with radius a . Hence, the function satisfies conditions (3) and (4). The final condition can be checked by using D_1E and D_2E values given in Equation (4) (constant coefficients are ignored since they only affect the speed of the solutions).

$$\begin{aligned}D_1E &= x(x^2 + y^2 - a) \\ D_2E &= y(x^2 + y^2 - a)\end{aligned}\quad (4)$$

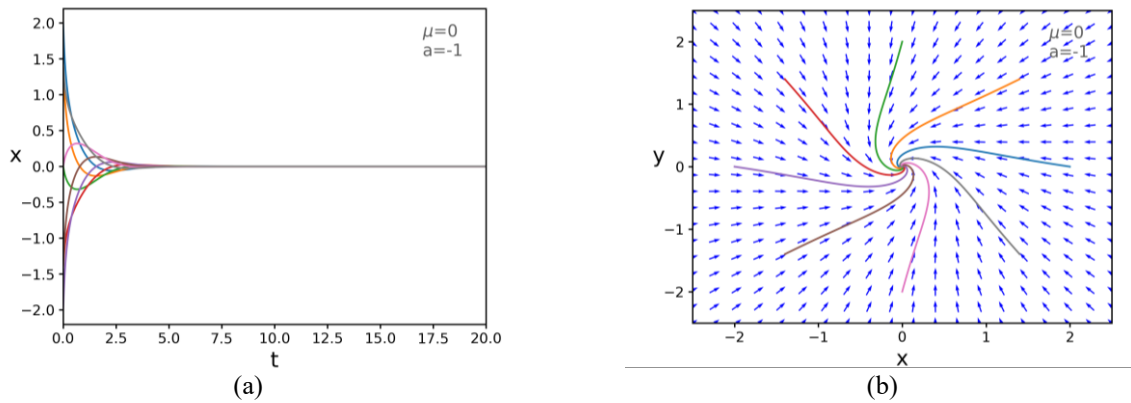


Figure 1. Gradient behavior for $a < 0$ and $\mu = 0$ (a) $x(t)$ graphs, (b) phase plane

Placing these expressions into the template equations gives us the system in Equation (5).

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -x(x^2 + y^2 - a) + \mu(x + y)(x^2 + y^2 - a) + ay \\ \dot{y} &= -y(x^2 + y^2 - a) + \mu(y - x)(x^2 + y^2 - a) - ax \end{aligned} \quad (5)$$

Since the shape of the curve L is a circle, the limit cycle will be a circle in the phase plane. Therefore, the oscillations will be sinusoidal. By choosing another function with a different L , limit cycles with different shapes can be easily obtained.

2.2 Gradient behavior

The obtained system in Equation (5) should act as a gradient system for $a < 0$ and $\mu \neq 1$. In this case, the origin is a globally stable equilibrium, and all solutions should asymptotically converge to the origin regardless of the initial conditions.

The simulation results for the gradient behavior are given in Figures 1 and 2. Various solutions are depicted in these figures for the initial conditions (2, 0), (1.4, 1.4), (0, 2), (-1.4, 1.4), (-2, 0), (-1.4, -1.4), (0, -2), and (1.4, -1.4). Figure 1 shows the solutions for $a = -1$ and $\mu = 0$. The solutions

quickly converge to the origin as expected. Figure 2 demonstrates what happens if μ value is increased from zero. For $a = -1$ and $\mu = 0.8$ the phase plane in Figure 2b has more rotations than the phase plane in Figure 1b. Due to the increased rotations, the solutions converge to zero more slowly as seen in Figure 2a.

2.3 Hamiltonian behavior

The obtained system in Equation (5) should act as a Hamiltonian system for $\mu = 1$ regardless of the value of parameter a . In this case, each initial condition should cause a separate periodic solution. Therefore, the phase plane of the system should be full of closed orbits.

The simulation results for Hamiltonian behavior are given in Figure 3. The solutions are calculated for the initial conditions (0.5, 0), (1, 0), (1.5, 0), and (2, 0). As seen from Figure 3a each initial condition yields a different oscillation with different amplitude and frequency. Therefore, each initial condition has its own closed orbit in the phase plane. This can be seen in Figure 3b.

Changing the parameter a has no effect on the solutions as long as $\mu = 1$. Hence, the same figures are obtained for different a values. However, it must be noted that the parameter a may change the shape of the closed orbits for other function E choices.

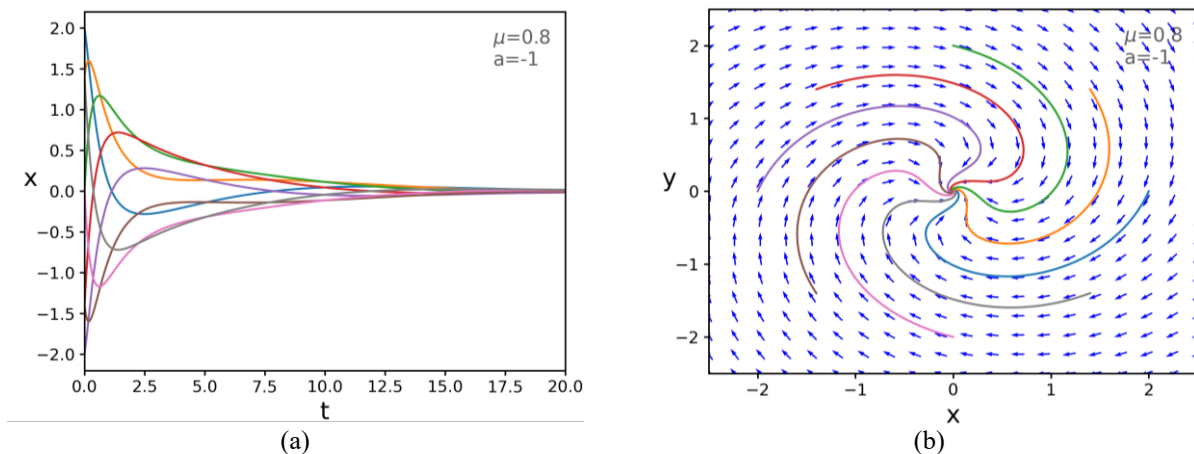


Figure 2. Gradient behavior for $a < 0$ and $\mu = 0.8$ (a) $x(t)$ graphs, (b) phase plane

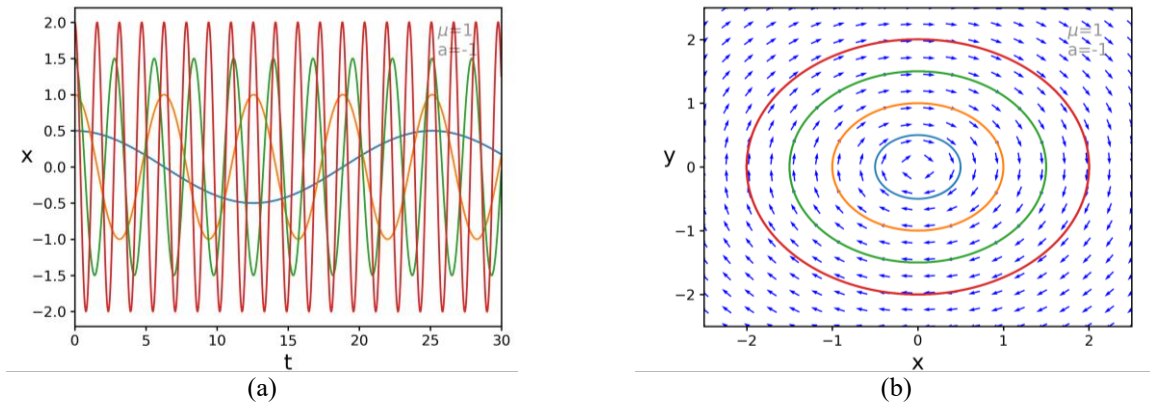


Figure 3. Hamiltonian behavior for $a = -1$ and $\mu = 1$ (a) $x(t)$ graphs, (b) phase plane

2.4 Limit cycle behavior

The obtained system in Equation (5) should act as a limit cycle system for $a > 0$ and $\mu \neq 1$. In this case, a globally stable limit cycle appears causing stable oscillations with constant amplitude and frequency regardless of the initial conditions (except the origin which is an unstable equilibrium). Due to the particular choice of the function E in Equation (3), the amplitude of the oscillations should be \sqrt{a} . This may not be the case for other energy functions.

The simulation results for the limit cycle behavior are given in Figures 4 and 5. The simulations are performed for

the initial conditions $(2, 2)$, $(-2, 2)$, $(-2, -2)$, $(2, -2)$, $(0.2, 0.2)$, and $(-0.2, -0.2)$. Figure 4 shows the solutions for $a = 1$ and $\mu = 0$. As seen from Figure 4a, all initial conditions settle into the stable limit cycle after some time. This can be seen more clearly from the phase plot given in Figure 4b.

Increasing the parameter a increases the amplitude of the oscillations. Increasing the parameter μ increases the rotations in the phase plane. This just prolongs the settling time, but solutions eventually settle into the limit cycle. Both of these situations are demonstrated in Figure 5 for parameter values $a = 2$ and $\mu = 0.8$.

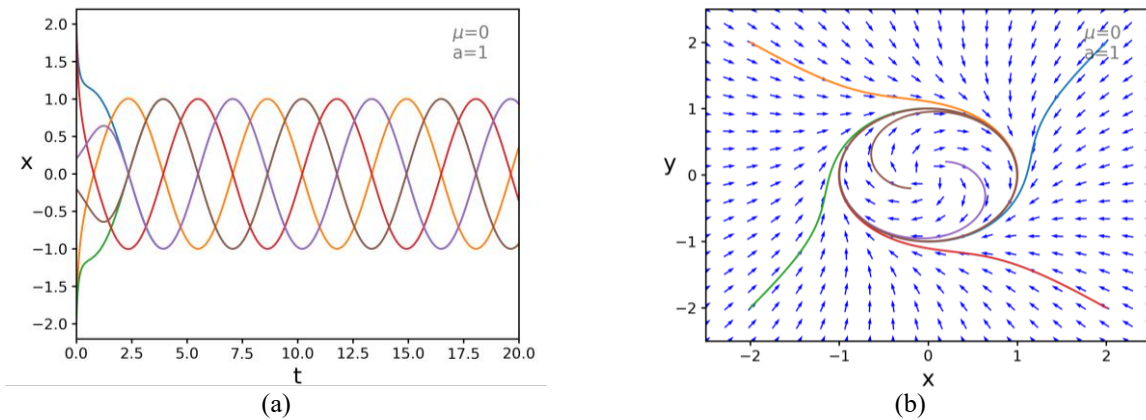


Figure 4. Limit cycle behavior for $a = 1$ and $\mu = 0$ (a) $x(t)$ graphs, (b) phase plane

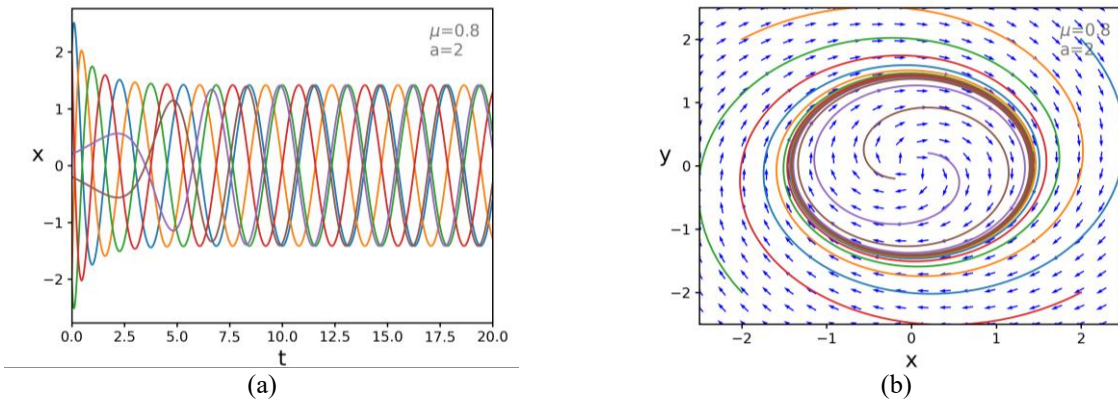


Figure 5. Limit cycle behavior for $a = 2$ and $\mu = 0.8$ (a) $x(t)$ graphs, (b) phase plane

3 FPGA implementation

Field programmable gate array (FPGA) is a reconfigurable digital integrated circuit. It can be reconfigured for different hardware designs, so it is very suitable for rapid prototyping. For this reason, the system in Equation (5) is implemented using an FPGA chip.

Since FPGA is a digital hardware, the system in Equation (5) should be discretized using an integration method. Euler's method is widely preferred for this purpose due to its implementation simplicity [23]. Even though this method is reliable for gradient and limit cycle systems, it is not suitable for Hamiltonian systems. Since each initial condition yields a different oscillation in Hamiltonian systems, integration errors cause a drift in the solutions. This drift constantly changes the amplitude of the oscillations resulting in a completely different behavior. The integration errors of Euler's method are too high for Hamiltonian systems. Therefore, this method cannot be used for our purposes.

Usually, symplectic integrators are preferred for the discretization of Hamiltonian systems [24]. However, these methods are either defined for separable Hamiltonian systems or they are implicit methods. The Hamiltonian case of the proposed template is not separable. Hence, easier and explicit separable symplectic methods cannot be used. On the other hand, other implicit symplectic methods involve finding roots in each calculation step. This is hard to implement on FPGA and calculations would consume many precious clock cycles. For these reasons, a non-symplectic but better integration method will be used for the discretization.

Explicit midpoint is another discretization method that involves two steps for each calculation [25]. This method is slightly more complicated than Euler's method, but it has far better performance with the Hamiltonian systems. As a matter of fact, all of the simulations in Section 2 are performed using the explicit midpoint method. However, it is still not a symplectic integrator, so its long-term stability is problematic with the Hamiltonian systems. To remedy this, additional hardware is designed to keep track of the integration errors when the parameter μ is set to 1. With this additional hardware, when the solutions come near the initial conditions, the difference from the initial conditions is calculated. When the difference is below some small threshold value, the next values of the solutions are reset to the initial conditions. This way, the oscillations do not drift away due to the accumulating integration errors, and long

term stability is achieved. For all practical purposes, this is not different than using a symplectic integrator.

The explicit midpoint method is described in Equation (6).

$$\begin{aligned} k_1 &= f(t_n, u_n) \\ k_2 &= f(t_n + \Delta t/2, u_n + (\Delta t/2)k_1) \\ u_{n+1} &= u_n + \Delta tk_2 \end{aligned} \quad (6)$$

Here, $f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ represents the right-hand side of the system in Equation (5), and $u = (x, y)$ represents points in \mathbb{R}^2 . As it is seen, it requires two steps for calculations. Instead of using similar hardware for each step, an integrator is designed which uses the same hardware for each step. This way, the area usage is reduced. The integrator design is given in Figure 6. This integrator uses two clock cycles for the calculations. The output is connected to D flip flops, which are enabled every two clock cycles with an activator. This allows outputs to be updated after the calculations finished. In the first clock cycle, Δt_{in} input takes $\Delta t/2$ value; f_{in} input takes u_n value. In the second clock cycle, Δt_{in} input takes Δt value; f_{in} input takes the output of the previous calculation stored in a separate register. This design reduces the area consumption, which is a very important design consideration for FPGAs.

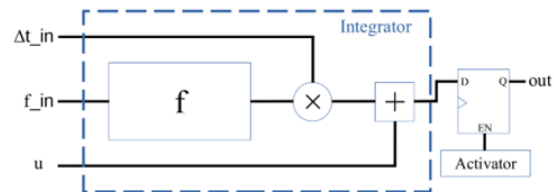


Figure 6. The integrator hardware

The block diagram of the FPGA implementation is given in Figure 7. The implementation consists of three main blocks. The leftmost block is the PLL (Phase Locked Loop) for clock generation. It feeds 1 MHz digital clock signal to other blocks. The middle block is the VHDL (Very High-Speed Integrated Circuit Hardware Description Language) implementation of the integrator in Figure 6. The integration is performed using 32-bit fixed-point arithmetic (Q7.24). Even though it seems that Equation (5) has many terms, the expression $(x^2 + y^2 - a)$ is repeated. So, only one hardware is used to calculate this value. The step size Δt is chosen as 0.01.

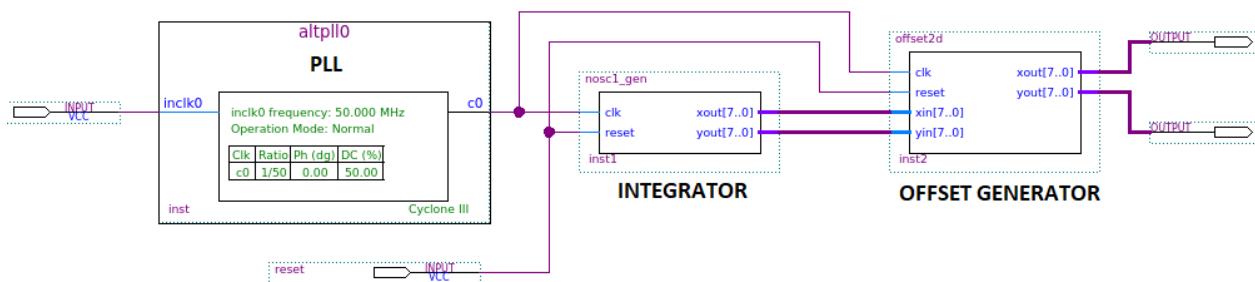


Figure 7. The block diagram of the FPGA implementation

The integrator block has two outputs representing x and y values of the Equation (5). These outputs are connected to the offset block for D/A (digital to analog) conversion. Since the D/A converters are 8-bit, 32-bit calculations are converted to 8-bit when sent to the offset block. The offset block simply adds an offset value to these 8-bit values. This offset causes generation of 2.5V DC offset voltage at the output of the D/A converters. This offset voltage is necessary because the D/A converters operate by a +5V single supply voltage. The offset voltage allows signals to swing around 2.5V.

The experimental setup is shown in Figure 8. The implementation is performed on Altera DE0 development board which contains Cyclone III FPGA chip (EP3C16F484C6). This FPGA has limited resources, but the design can easily fit inside such a low-cost FPGA. The PCB (printed circuit board) in the lower left corner of the figure contains two D/A converter chips. The outputs of the D/A converters are observed with a two-channel oscilloscope. The implementation results are summarized in Table 1. Since the Hamiltonian case requires additional hardware for the reset operation, the results for the Hamiltonian case are given separately.

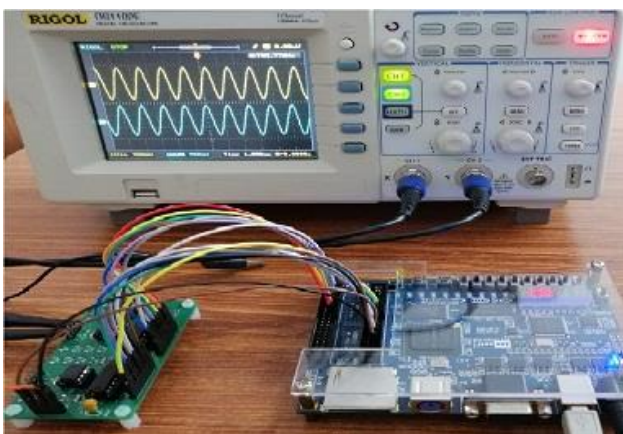


Figure 8. The experimental setup

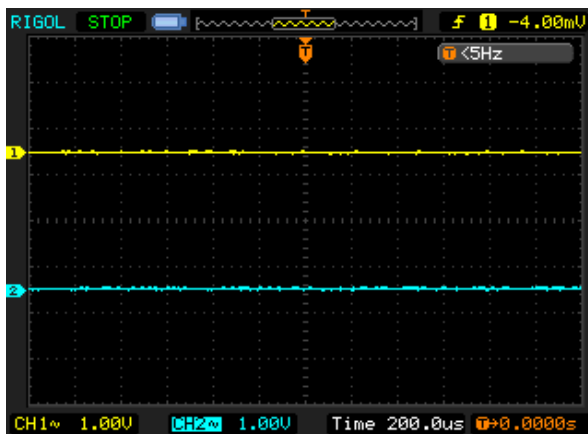
Table 1. FPGA implementation results

Parameters	Hamiltonian	Gradient / Limit Cycle
Area Consumption (Logic Elements)	2645 (17%)	2259 (15%)
Memory Usage (Flip Flop)	179 (1%)	145 (1%)
Multiplier Usage	64 (57%)	64 (57%)
Maximum Frequency	11.75 MHz	12.27 MHz

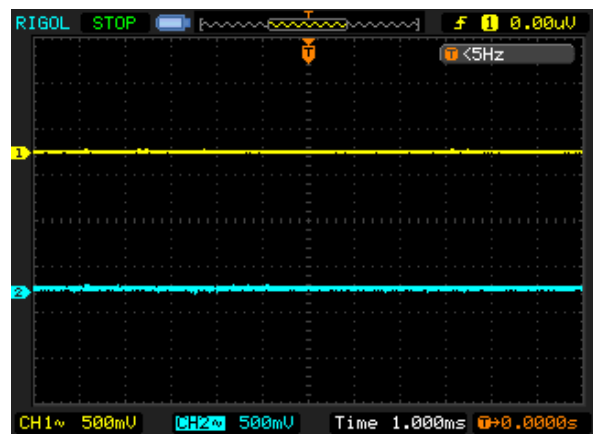
The oscilloscope views of the gradient case for the parameter values $\mu = 0$ and $a = -1$ are presented in Figure 9. For all views, the upper signal is the channel 1 (CH1) of the oscilloscope and it corresponds to the x values. The lower signal, on the other hand, is the channel 2 (CH2) of the oscilloscope and it corresponds to the y values.

The result for the initial condition (1.4, -1.4) is seen in Figure 9a. Similarly, the result for the initial condition (2, 1.4) is seen in Figure 9b. Since convergence is too fast, it is not possible to observe the convergence from the initial conditions to zero using the oscilloscope. Therefore, the gradient case observation in both figures are straight lines. As predicted, the orbits settle into the equilibrium regardless of the initial conditions.

The oscilloscope views of the Hamiltonian case are given in Figure 10 for the parameter values $\mu = 1$ and $a = -1$. In this figure results for different initial conditions are given. Figures 10a and 10b are the results for the initial condition (0.5, 0). On the other hand, Figures 10c and 10d are the results for the initial condition (1, 0). As it is seen from Figures 10a and 10c, the amplitude and the frequency of the oscillation are increased for the latter initial condition. The exact values of the frequency are written at the top right corner of Figures 10a and 10c. As expected, different initial conditions yield an oscillation with different frequency and amplitude. This is the expected behavior for the Hamiltonian case. Also, it should be noted that the oscillations are stable, and they do not drift away with time due to the integration errors.



(a)



(b)

Figure 9. Oscilloscope view of the gradient behavior outputs: (a) for the initial condition (1.4, -1.4); (b) for the initial condition (2, 1.4)

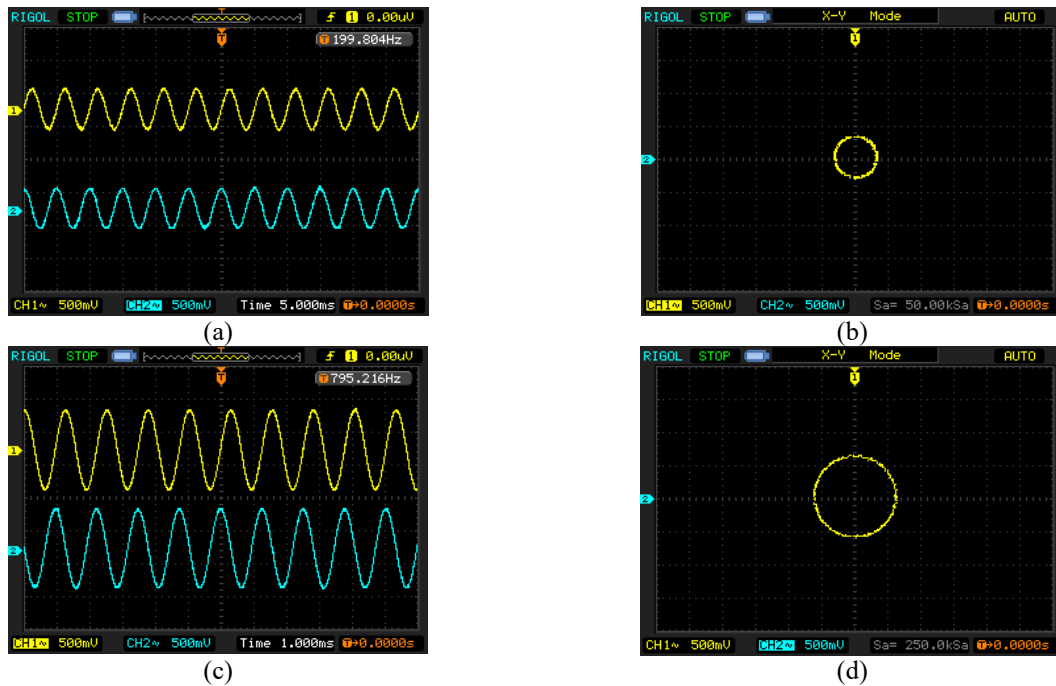


Figure 10. Oscilloscope views of the Hamiltonian behavior outputs: (a) and (b) are for the initial condition (0.5, 0); (c) and (d) are for the initial condition (1, 0)

Finally, the oscilloscope views of the limit cycle case are given in [Figure 11](#) and [Figure 12](#). The results for the parameter values $\mu = 0$, $a = 1$, and the initial condition (2, -2) are presented in [Figures 11a](#) and [11b](#). The results for the initial condition (0.2, -0.2) under the same parameter values are shown in [Figures 11c](#) and [11d](#). As it is seen, different initial conditions yield the same oscillation and changing the initial conditions does not change the frequency or the amplitude of the oscillation.

For the limit cycle case, oscillations with different amplitude and frequency can be obtained by changing the parameter a . [Figure 12](#) demonstrates this case for the parameter values $\mu = 0.8$, $a = 2$ and the initial condition (0.2, 0.2). As it is seen, the amplitude and the frequency of the oscillation are different from the results in [Figure 11](#).

The FPGA implementation confirms the numerical simulations in Section 2. All behaviors of the obtained systems can be successfully used in practical applications.

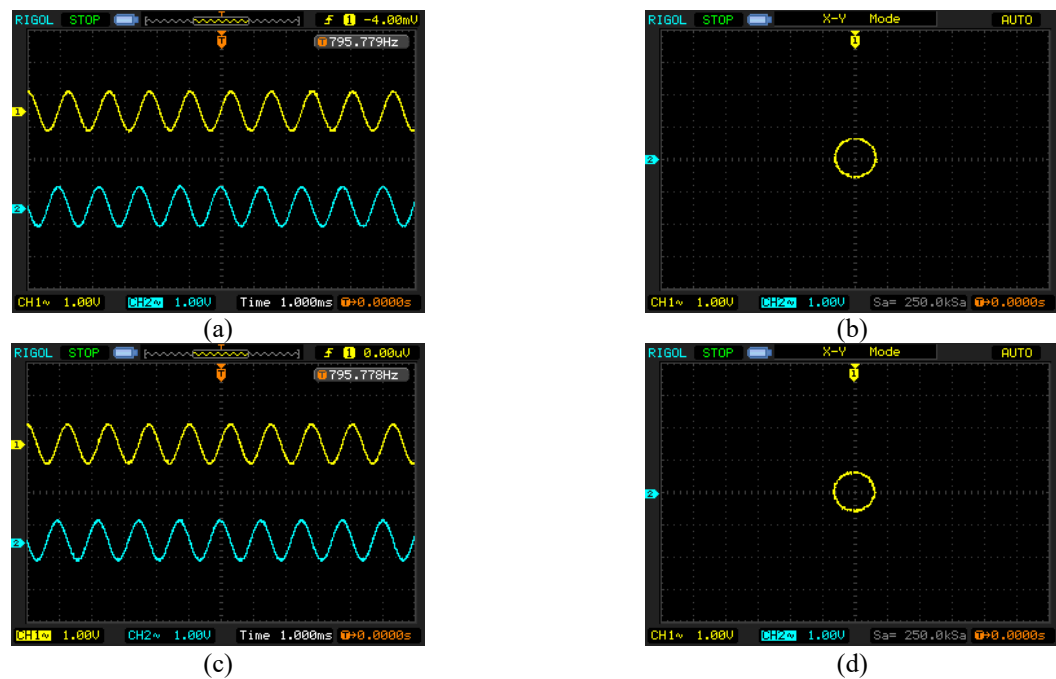


Figure 11. Oscilloscope views of the limit cycle behavior outputs: (a) and (b) are for the initial condition (2, -2); (c) and (d) are for the initial condition (0.2, -0.2)

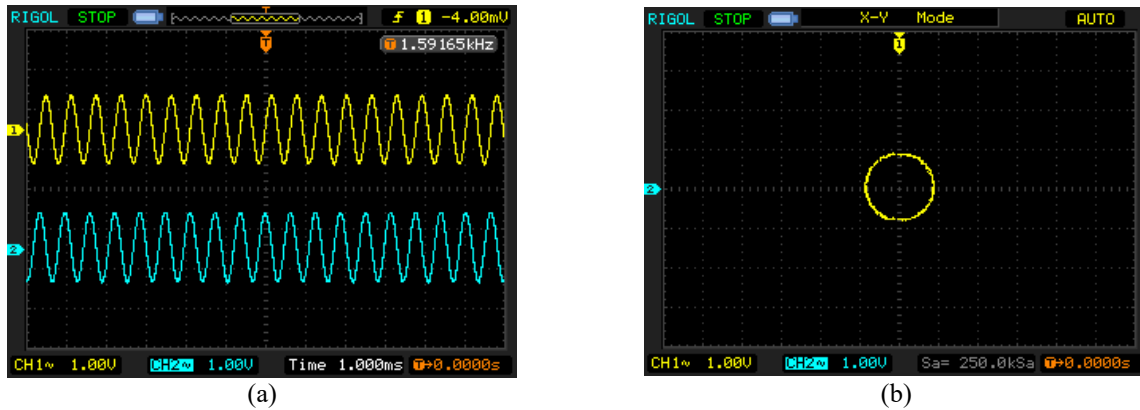


Figure 12. Oscilloscope views of the limit cycle behavior outputs for the parameter values $\mu = 0.8$ and $a = 2$

4 Conclusions

The proposed design template can help researchers to design their own nonlinear oscillators without delving into the details of the dynamical system analysis. This is especially helpful because nonlinear oscillators are needed in many disciplines, but researchers may not be too familiar with dynamical systems. The obtained systems are globally stable, so they can be used without concerning about their basin of attractions. The obtained systems can exhibit three main behaviors of dynamical systems namely gradient, Hamiltonian, and limit cycle behavior. Therefore, rich dynamics are observed with the same system. Oscillators with different shapes can be obtained by choosing different energy functions. The amplitude and the frequency of the oscillations can be adjusted by changing the parameter values or the initial conditions depending on the chosen behavior. Also, the FPGA implementation shows that the obtained systems can be used in practical applications. Especially, the solution presented in Section 3 for the long-term stability problem of the Hamiltonian systems can be helpful to the practical applications of Hamiltonian systems.

Conflict of interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Similarity rate (iThenticate): 9 %

References

- [1] P. Kakou, S. K. Gupta, and O. Barry, A nonlinear analysis of a Duffing oscillator with a nonlinear electromagnetic vibration absorber–inertor for concurrent vibration mitigation and energy harvesting. *Nonlinear Dynamics*, 112(8), 5847–5862, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11071-023-09163-6>.
- [2] W. Tian, T. Zhao, and Z. Yang, Supersonic meta-plate with tunable-stiffness nonlinear oscillators for nonlinear flutter suppression. *International Journal of Mechanical Sciences*, 229107533, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107533>.
- [3] Y. Zhu, Y. Wu, Q. Liu, T. Guo, R. Qin, and J. Hui, A backward control based on σ -Hopf oscillator with decoupled parameters for smooth locomotion of bio-inspired legged robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 106165–178, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.05.009>.
- [4] A. J. Adéchinan, Y. J. F. Kpomahou, L. A. Hinvi, and C. H. Miwadinou, Chaos, coexisting attractors and chaos control in a nonlinear dissipative chemical oscillator. *Chinese Journal of Physics*, 772684–2697, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cjph.2022.03.052>.
- [5] F. Morán and A. Goldbeter, Onset of birhythmicity in a regulated biochemical system. *Biophysical Chemistry*, 20(1–2), 149–156, 1984. [https://doi.org/10.1016/0301-4622\(84\)80014-9](https://doi.org/10.1016/0301-4622(84)80014-9).
- [6] A. Goldbeter, Computational approaches to cellular rhythms. *Nature*, 420(6912), 238–245, 2002. <https://doi.org/10.1038/nature01259>.
- [7] H. G. Mayr and K. H. Schatten, Nonlinear oscillators in space physics. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 7444–50, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.09.008>.
- [8] X. Huang and Q. Cao, A novel nonlinear oscillator consisting torsional springs and rigid rods. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 161104684, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2024.104684>.
- [9] N. Inaba, H. Okazaki, and H. Ito, Nested mixed-mode oscillations in the forced van der Pol oscillator. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 133107932, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2024.107932>.
- [10] L. Zhu, Dynamics of switching van der Pol circuits. *Nonlinear Dynamics*, 87(2), 1217–1234, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11071-016-3111-8>.
- [11] A. Jenkins, Self-oscillation. *Physics Reports*, 525(2), 167–222, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2012.10.007>.
- [12] E. M. Izhikevich, Simple model of spiking neurons. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 14(6), 1569–1572, 2003. <https://doi.org/10.1109/TNN.2003.820440>.
- [13] N. Korkmaz, İ. Öztürk, and R. Kılıç, Modeling, simulation, and implementation issues of CPGs for neuromorphic engineering applications. *Computer Applications in Engineering Education*, 26(4), 782–803, 2018. <https://doi.org/10.1002/cae.21972>.

- [14] N. Dahasert, İ. Öztürk, and R. Kılıç, Experimental realizations of the HR neuron model with programmable hardware and synchronization applications. *Nonlinear Dynamics*, 70(4), 2343–2358, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11071-012-0618-5>.
- [15] N. Korkmaz, İ. Öztürk, and R. Kılıç, Multiple perspectives on the hardware implementations of biological neuron models and programmable design aspects. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 24(3), 1729–1746, 2016. <https://doi.org/10.3906/elk-1309-5>.
- [16] Yu. A. Tsybina, S. Yu. Gordleeva, A. I. Zharinov, I. A. Kastalskiy, A. V. Ermolaeva, A. E. Hramov, and V. B. Kazantsev, Toward biomorphic robotics: A review on swimming central pattern generators. *Chaos, Solitons & Fractals*, 165112864, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2022.112864>.
- [17] N. K. Kasabov, *Time-Space, Spiking Neural Networks and Brain-Inspired Artificial Intelligence*, Springer Series on Bio and Neurosystems, Springer, Berlin, Heidelberg, 2019.
- [18] E. E. Sel'kov, Self-oscillations in glycolysis 1. A simple kinetic model. *European Journal of Biochemistry*, 4(1), 79–86, 1968. <https://doi.org/10.1111/j.1432-1033.1968.tb00175.x>.
- [19] P. Belardinelli and S. Lenci, A first parallel programming approach in basins of attraction computation. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 8076–81, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2015.10.016>.
- [20] J. K. Moser, *Lectures on Hamiltonian systems*. In *Hamiltonian Dynamical Systems*, CRC Press, 1987.
- [21] S. H. Strogatz, *Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering*, 2nd Edn., CRC Press, 2019.
- [22] J. Cortés, A. J. van der Schaft, and P. E. Crouch, Gradient realization of nonlinear control systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 36(2), 63–68, 2003. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)38868-7](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)38868-7).
- [23] İ. Öztürk and R. Kılıç, A novel method for producing pseudo random numbers from differential equation-based chaotic systems. *Nonlinear Dynamics*, 80(3), 1147–1157, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11071-015-1932-5>.
- [24] P. J. Channell and C. Scovel, Symplectic integration of Hamiltonian systems. *Nonlinearity*, 3(2), 231, 1990. <https://doi.org/10.1088/0951-7715/3/2/001>.
- [25] J. Sundnes, *Solving ordinary differential equations in python*, Springer Nature, 2024.





Determination of quality characteristics of some Monofloral, Polyfloral and Honeydew honeys in terms of physical properties and Proline content

Fiziksel özellikler ve Prolin içeriği bakımından bazı Monofloral, Polifloral ve Salgı ballarının kalite özelliklerinin tespiti

Merve Özbay^{1,*} , Fatma Nur Arslan² , Gazi Görür³ 

¹ Karamanoglu Mehmetbey University, Department of Gastronomy and Culinary Arts, 70100, Karaman, Türkiye

² Karamanoglu Mehmetbey University, Department of Chemistry, 70100, Karaman, Türkiye

³ Niğde Ömer Halisdemir University, Department of Biotechnology, 51240, Niğde, Türkiye

Abstract

This study aims to investigate some physical properties and proline content of 95 different honey samples to reveal their characteristic features and evaluate their quality according to the Turkish Food Codex. The moisture content, which is highly important parameter in determining the shelf life of honeys, determined between 14.60% and 21.20% and these values were determined to be within the limits (<20%) except for four honey samples. The brix values of honey samples were examined between 77.23% and 83.60%, and they were found to be within the acceptable range. The other physical parameter, namely the electrical conductivity values of samples determined between 0.11 and 1.20 mS/cm. Proline, which is an important value in determining the type and maturity of honey and is the amino acid found in the highest amount in honey, should be above 300 mg/kg in honey, according to the communiqué. The proline amount of the honey samples examined varied between 281.61 and 2259.43 mg/kg. It was determined that the proline amount of two honey samples were below the limit. It was concluded that most of the tested samples were in compliance with the food codex in terms of quality standards.

Anahtar kelimeler: Honey, Proline, Brix, Electrical conductivity, Moisture

1 Introduction

Honey is one of the most complicated nutrition produced by honeybees from the plants or nectar of diverse honeydews [1, 2]. It has an important situate in human nutrition. Although most of its ingredient is sugar, it does not only occur of sugar, but also it includes nutritive and medicinal effects [3]. Due to its amino acid, organic acid, mineral, vitamin, enzyme and flavonoid contents, is a significant food that is nutritive, easily digestible and has preventive properties opposite diverse diseases [4-7]. The chemical compound of honey varies according to its geographic and botanic root. But, the honey basically occurs of macro and micro ingredients such as 17% water, 82% carbohydrates, 0.3% protein, 0.7% minerals, organic acids, vitamins, free amino acids and phenols compounds [8-10]. Proline,

Öz

Çalışma, balların karakteristik özelliklerini ortaya koymak ve Türk Gıda Kodeksi Tebliğine göre kalitelerini değerlendirmek için 95 farklı bal numunesinin bazı fiziksel özelliklerini ve prolin miktarını araştırmayı amaçlamaktadır. Balların raf ömürlerinin belirlenmesinde oldukça önemli bir parametre olan nem içeriği, incelenen bal numunelerinde %14.60-%21.20 arasında değişim göstermiştir ve dört bal numunesi hariç limitler (<%20) dahilinde olduğu belirlenmiştir. İncelenen bal numunelerinin briks değerleri %77.23-%83.60 arasında değişim göstermiştir ve kabul edilebilir aralıkta olduğu görülmüştür. Bal numunelerinin elektriksel iletkenlik değerleri 0.11-1.20 mS/cm arasında değişim göstermiştir. Balın tipinin ve olgunluğunun belirlenmesinde yararlı ve önemli bir değer olan ve balda en yüksek oranda bulunan aminoasit olan prolin, ballarda tebliğe göre 300 mg/kg'ın üzerinde olmalıdır. İncelenen bal numunelerinin prolin miktarı 281.61-2259.43 mg/kg aralığında değişim göstermiştir. İki bal numunesinin prolin miktarlarının limitin altında olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, test edilen bal numunelerinin çoğunun kalite açısından gıda kodeksi ile uyumlu olduğu kanaatine varılmıştır.

Keywords: Bal, Prolin, Brix, Elektriksel iletkenlik, Nem

elements, moisture, 5-hydroxymethylfurfural (HMF), organic acids, enzymes, vitamins, sugar, pH, glucose and fructose ratios, electrical conductivity, acidity, etc. parameters define the valuation of honeys [11]. As honey is an essential daily-life dietary addition, it is significant to appraise its quality to provide its purity and to be sure that it has all components available in it. This quality control assessment could be done by determining the physicochemical parameters and to evaluate the purity of honeys [12-14]. The moisture is an important parameter in determining the shelf life of honey. The high moisture value causes premature deterioration and crystallization of honey [15, 16]. This parameter means in defining water content of honey ingredients which influences honey stability opposite fermentation. Besides, moisture analysis could help the

* Sorumlu yazar/ Corresponding author, e-posta / e-mail: mozbay@kmu.edu.tr (M. Özbay)

Geliş / Recieved: 24.06.2024 Kabul / Accepted: 29.07.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1503821

honey manufacturer to protect the carrying terms and suitable storage [17]. Since electrical conductivity is an important criterion in determining the botanical origin of honey, it is frequently used for routine controls of honey [18] and is an important criterion in distinguishing secretion honey from flower honey [19]. The degree of unadulterated honey varies between 78.8-84.0%. The brix degree of honey is related not only to its sugar content but also to its moisture [20]. The proline constitutes 50-85% of the amino acids found in honey [21]. The honey has been reported to contain higher levels of proline and potassium than adulterated honey [22].

Herein, to reveal the characteristic features of honey and evaluate their quality according to the Turkish Food Codex Honey Communiqué [23], some physical properties (moisture content, brix percentage, electrical conductivity) and proline amount of 95 different flower and honeydew honey samples were investigated.

2 Material and methods

2.1 Chemicals and instruments.

Proline (European Pharmacopoeia EP), ultrapure water, 2-propanol, formic acid and ninhydrin were purchased from commercial suppliers and used directly without any purification. An Agilent Cary 60 UV-Vis spectrophotometer was used to record spectra of proline analyses. Kyoto KEM RA-600 refractometer was used to record moisture and brix data. For the electrical conductivity analysis, Mettler Toledo SevenCompact conductivity device was used.

2.2 Samples

95 honey samples including 12 kinds of monofloral honey (MH) samples [n=55 honeys; thyme (MH_TV1 to TV6), acacia (MH_A1 to A2), carob (MH_C1 to C5), chestnut (MH_CH1 to CH6), black cumin (MH_BC1 to BC4), milk vetch (MH_MV1 to MV7), sunflower (MH_S1 to S3), citrus (MH_CF1 to CF8), rhododendron (MH_R1 to R3), thistle (MH_T1), linden (MH_L1 to L5), lavender (MH_FL1 to FL5)], 20 polyfloral honey (PH) samples obtained from 2019-2020 seasons (n=20; PH_1 to 20) and 2 kinds of honeydew honeys (HH) [n=20 honeys; honeydew (HH_H1 to H14) and oak (HH_O1 to O6)] were used. All samples were purchased from the local markets, factory outlets and local beekeepers, and they were stored at +4°C in a cabinet away from daylight.

2.3 Moisture analysis

The amount of moisture in honey samples was determined by using the refractive index value obtained at 20 °C with a calibrated refractometer and the moisture calculation chart [24]. For this purpose, a moisture amount of each sample was taken and placed on the prism of the refractometer, the lid was closed so that no air bubbles remained and three repeated readings were made.

2.4 Brix analysis

Brix values at 20 °C were measured at least three times using a calibrated refractometer device and their means were expressed as % brix values [25].

2.5 Electrical conductivity analysis

Electrical conductivity analyses were carried out according to the Turkish Standard method [26]. After dissolving 10 g of honey sample with 100 mL of ultrapure water, repeated readings were performed with a calibrated conductivity measuring device. By averaging the data, the electrical conductivity of the honey samples at 25 °C was reported as mS/cm.

2.6 Proline analysis

The proline analyses of honeys were carried out by using UV-Vis spectrophotometer, based on the principle that the amino acid proline forms a colored complex with ninhydrin that gives absorbance at 510 nm. 40 mg of dried proline was dissolved with ultrapure water and made up to 50 mL in a volumetric flask. Standard proline solutions were prepared by taking 0.5 mL, 1 mL and 2 mL of the prepared stock proline solution. 0.5 mL of each of these solutions was taken and placed in glass tubes. 1 mL of formic acid and 1 mL of 3% ninhydrin solution were added, and the tubes were shaken carefully and vigorously for 15 minutes. At the end of shaking, it was kept in a boiling water bath for 15 min. Then it was kept in a 70 °C water bath for 10 min. Immediately at the end of the period, 5 mL of 50% 2-propanol solution was added to the tubes. The tubes were turned upside down and read at 510 nm [27].

5 g of honey was weighed, dissolved in 50 mL of ultrapure water, transferred to the volumetric flask and made up to 100 mL with ultrapure water, and the tube was shaken. 0.5 mL of the honey solution was taken and placed in the test tube. For the blank sample, 0.5 mL of ultrapure water was put into the test tube. 1 mL of formic acid and 1 mL of 3% ninhydrin solution were added and the tubes were shaken carefully for 15 min. At the end of shaking, it was kept in a boiling water bath for 15 min. Then it was kept in a 70 °C water bath for 10 min. Immediately at the end of the period, 5 mL of 2-propanol solution was added to the tubes. The tubes were inverted and their concentrations (mg/kg) were recorded at 510 nm.

3 Results and discussion

3.1 Moisture

It was determined that the moisture content of the honey samples used in this study varied between 14.60% and 21.20% (Table 1). While the highest moisture content was detected for the MH_L4 honey sample, the lowest moisture content was detected for the MH_MV3 honey sample. It has been determined that some honeys have a moisture content of over 20%.

3.2 Brix

The brix values of honey samples were found between 77.23% and 83.60%. The highest brix value was determined for the MH_MV3, MH_A2 and HH_O2 honey samples (Table 1). The lowest moisture content was determined for the MH_MV3 honey sample, which indicates a high brix value. It was concluded that honey with low % moisture content had high % brix values.

3.3 Electrical conductivity

The electrical conductivity values of honey samples were determined between 0.11 and 1.20 mS/cm (Table 1). The electrical conductivity of honey depends on the mineral content of honey. According to the Turkish Food Codex Honey Communiqué (Communiqué No: 2020/7), the electrical conductivity value in flower honey should not be more than 0.8 mS/cm. The electrical conductivity values of the monofloral and polyfloral honey samples tested in this study were found to be in accordance with the communiqué. It has been stated that this value should be at least 0.8 mS/cm for honeydew honeys and chestnut honeys, which are monofloral honeys. The results of the electrical conductivity were in accordance with the communiqué, except for the chestnut honey samples (MH_CH1, MH_CH3 and MH_CH4). Since honeydew honey is a mixture of flower honey, its electrical conductivity values were determined to be less than 0.8 mS/cm.

3.4 Proline

The amounts of proline were given by calculating the standard proline concentrations versus absorbance value in Figure 1, according to the formulation $y=5.6929x+0.0323$. The values were reported by calculating the proline amounts of honeys (mg/kg) (Table 1). According to the Turkish Food Codex, the proline value of honey should be over 300 mg/kg. The amounts of proline in samples were found between 281.61 and 2259.43 mg/kg. It was observed that the levels were lower in MH_A2 and MH_CF5 samples compared to the other samples. The highest amount of proline was detected for the MH_BC2 sample. The average proline amount of monofloral honey samples was found to be 939.38 mg/kg, the average proline amount of polyfloral honey samples was 870.00 mg/kg, and the average proline amount of honeydew honey samples was 1008.58 mg/kg. Thus, the proline values were high on average and in accordance with the values determined by the food codex.

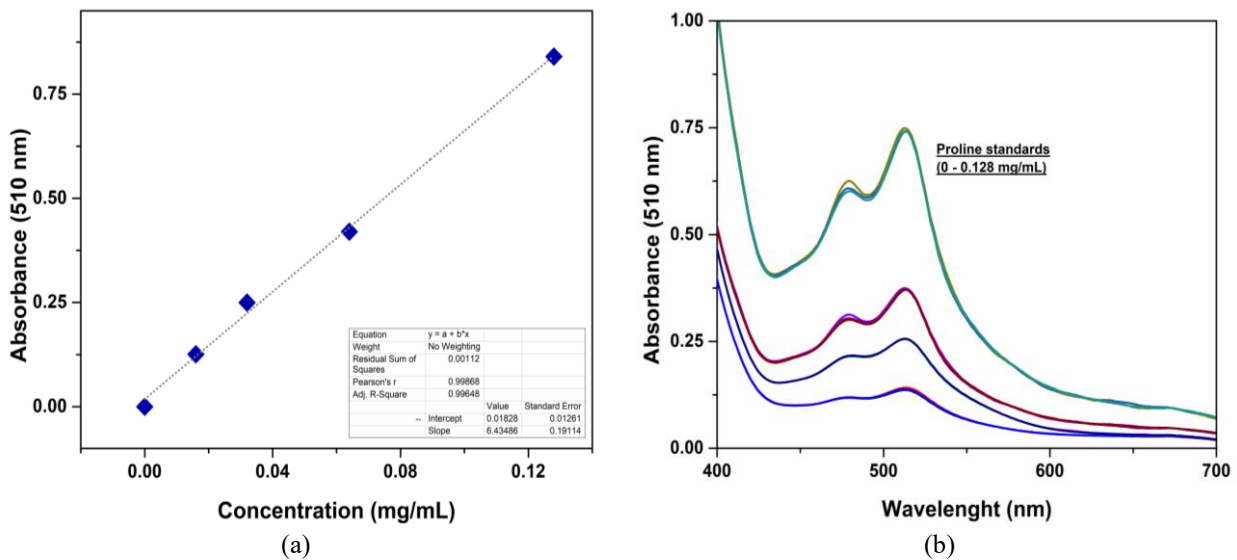


Figure 1. (a) Calibration graph and (b) spectra recorded with proline standard material

Table 1. Results for the moisture, brix, electrical conductivity and proline analyses of honeys

	Moisture, %	Brix, %	Electrical conductivity, mS/cm	Proline content, mg/kg
MH Samples				
MH_A1	16.70 ±0.00	81.57 ±0.06	0.24 ±0.01	705.89 ±0.00
MH_A2	14.70 ±0.00	83.57 ±0.06	0.18 ±0.00	281.61 ±0.00
MH_BC1	20.20 ±0.00	78.20 ±0.00	0.67 ±0.00	2031.78 ±0.00
MH_BC2	18.30 ±0.00	80.07 ±0.06	0.48 ±0.09	2259.43 ±0.00
MH_BC3	17.80 ±0.00	80.50 ±0.00	0.47 ±0.12	1923.88 ±0.00
MH_BC4	16.90 ±0.00	81.30 ±0.10	0.44 ±0.07	2246.04 ±0.00
MH_C1	16.50 ±0.00	81.73 ±0.15	0.61 ±0.01	651.11 ±0.00
MH_C2	16.70 ±0.00	81.57 ±0.06	0.23 ±0.00	357.20 ±0.00
MH_C3	16.20 ±0.00	82.03 ±0.15	0.60 ±0.01	1078.52 ±0.00
MH_C4	16.90 ±0.00	81.37 ±0.12	0.41 ±0.01	802.73 ±0.00
MH_C5	16.90 ±0.00	81.40 ±0.17	0.41 ±0.01	942.71 ±0.00
MH_CF1	17.30 ±0.00	81.03 ±0.06	0.17 ±0.05	608.19 ±0.00
MH_CF2	18.30 ±0.00	80.00 ±0.00	0.11 ±0.00	378.48 ±0.00
MH_CF3	15.60 ±0.00	82.60 ±0.10	0.22 ±0.04	687.21 ±0.00

MH_CF4	18.10 ±0.00	80.20 ±0.10	0.39 ±0.01	637.63 ±0.00
MH_CF5	19.30 ±0.00	78.97 ±0.21	0.19 ±0.06	292.19 ±0.00
MH_CF6	20.30 ±0.00	78.07 ±0.06	0.48 ±0.02	794.26 ±0.00
MH_CF7	18.20 ±0.00	80.10 ±0.00	0.17 ±0.05	445.77 ±0.00
MH_CF8	18.70 ±0.00	79.73 ±0.06	0.20 ±0.05	387.97 ±0.00
MH_CH1	16.30 ±0.00	81.93 ±0.06	0.74 ±0.00	907.12 ±0.00
MH_CH2	17.50 ±0.00	80.70 ±0.10	1.07 ±0.00	1341.82 ±0.00
MH_CH3	18.20 ±0.00	80.13 ±0.06	0.77 ±0.01	1457.05 ±0.00
MH_CH4	17.50 ±0.00	80.80 ±0.10	0.63 ±0.00	976.23 ±0.00
MH_CH5	17.80 ±0.00	80.50 ±0.10	1.16 ±0.01	835.97 ±0.00
MH_CH6	17.30 ±0.00	81.03 ±0.15	1.20 ±0.00	1110.35 ±0.00
MH_FL1	15.90 ±0.00	82.37 ±0.06	0.28 ±0.05	1596.38 ±0.00
MH_FL2	16.10 ±0.00	82.10 ±0.10	0.17 ±0.03	943.04 ±0.01
MH_FL3	17.10 ±0.00	81.10 ±0.10	0.21 ±0.00	1671.96 ±0.00
MH_FL4	17.70 ±0.00	80.53 ±0.15	0.23 ±0.03	1470.23 ±0.00
MH_FL5	17.70 ±0.00	80.53 ±0.06	0.28 ±0.01	1356.39 ±0.00
MH_L1	18.70 ±0.00	79.33 ±0.29	0.34 ±0.00	711.66 ±0.00
MH_L2	18.00 ±0.00	80.30 ±0.00	0.46 ±0.10	680.44 ±0.00
MH_L3	16.90 ±0.00	81.33 ±0.06	0.31 ±0.07	735.68 ±0.00
MH_L4	21.20 ±0.00	77.23 ±0.06	0.31 ±0.06	549.68 ±0.00
MH_L5	16.50 ±0.00	81.80 ±0.10	0.35 ±0.07	806.78 ±0.00
MH_MV1	17.40 ±0.00	80.87 ±0.12	0.17 ±0.00	762.92 ±0.00
MH_MV2	17.30 ±0.00	80.97 ±0.06	0.18 ±0.00	1121.83 ±0.00
MH_MV3	14.60 ±0.00	83.60 ±0.00	0.15 ±0.00	512.86 ±0.00
MH_MV4	15.60 ±0.00	82.60 ±0.10	0.50 ±0.00	446.25 ±0.00
MH_MV5	17.70 ±0.00	80.63 ±0.06	0.22 ±0.05	883.04 ±0.00
MH_MV6	16.90 ±0.00	81.43 ±0.06	0.19 ±0.00	664.86 ±0.00
MH_MV7	15.90 ±0.00	82.40 ±0.10	0.31 ±0.00	958.07 ±0.00
MH_R1	18.90 ±0.00	79.37 ±0.12	0.38 ±0.04	750.18 ±0.00
MH_R2	16.90 ±0.00	81.33 ±0.06	0.71 ±0.02	1137.38 ±0.00
MH_R3	17.30 ±0.00	80.93 ±0.06	0.52 ±0.04	698.98 ±0.00
MH_S1	18.70 ±0.00	79.60 ±0.10	0.29 ±0.01	712.08 ±0.00
MH_S2	19.30 ±0.00	79.03 ±0.25	0.29 ±0.00	904.40 ±0.00
MH_S3	18.70 ±0.00	79.60 ±0.00	0.23 ±0.01	545.62 ±0.00
MH_T1	15.90 ±0.00	82.30 ±0.10	0.38 ±0.02	973.75 ±0.00
MH_TV1	16.00 ±0.00	82.27 ±0.12	0.42 ±0.00	1233.27 ±0.00
MH_TV2	17.90 ±0.00	80.30 ±0.00	0.40 ±0.01	742.11 ±0.00
MH_TV3	16.50 ±0.00	81.70 ±0.10	0.32 ±0.02	1177.56 ±0.00
MH_TV4	16.90 ±0.00	81.23 ±0.12	0.22 ±0.00	1162.43 ±0.00
MH_TV5	16.40 ±0.00	81.87 ±0.49	0.66 ±0.01	813.56 ±0.00
MH_TV6	16.10 ±0.00	82.17 ±0.21	0.39 ±0.09	801.64 ±0.00
PH Samples				
PH1	16.30 ±0.00	81.93 ±0.06	0.19 ±0.00	746.18 ±0.00
PH2	15.30 ±0.00	82.90 ±0.10	0.51 ±0.01	1352.52 ±0.00
PH3	15.50 ±0.00	82.80 ±0.00	0.77 ±0.02	622.49 ±0.00
PH4	18.10 ±0.00	80.17 ±0.06	0.21 ±0.01	988.10 ±0.00
PH5	15.10 ±0.00	83.20 ±0.10	0.22 ±0.01	792.53 ±0.00
PH6	18.70 ±0.00	79.60 ±0.10	0.36 ±0.00	1245.08 ±0.00
PH7	18.10 ±0.00	80.13 ±0.06	0.23 ±0.00	1231.61 ±0.00
PH8	16.50 ±0.00	81.80 ±0.10	0.19 ±0.01	938.58 ±0.00
PH9	16.90 ±0.00	81.30 ±0.00	0.25 ±0.00	858.29 ±0.00
PH10	19.10 ±0.00	79.23 ±0.06	0.23 ±0.00	467.15 ±0.00
PH11	18.10 ±0.00	80.30 ±0.10	0.30 ±0.00	1313.36 ±0.00
PH12	16.60 ±0.00	81.63 ±0.06	0.26 ±0.00	917.77 ±0.00
PH13	16.50 ±0.00	81.73 ±0.06	0.25 ±0.00	1258.06 ±0.00
PH14	16.00 ±0.00	82.23 ±0.06	0.36 ±0.01	1085.91 ±0.00
PH15	20.70 ±0.00	77.63 ±0.06	0.19 ±0.00	502.15 ±0.00
PH16	17.90 ±0.00	80.30 ±0.00	0.20 ±0.01	458.93 ±0.00
PH17	17.40 ±0.00	80.90 ±0.10	0.30 ±0.01	332.26 ±0.00
PH18	18.10 ±0.00	80.20 ±0.00	0.22 ±0.00	563.48 ±0.00
PH19	18.00 ±0.00	80.30 ±0.00	0.15 ±0.00	579.38 ±0.00

PH20	18.00 ±0.00	80.30 ±0.00	0.16 ±0.02	1146.22 ±0.00
HH Samples				
HH_H1	16.30 ±0.00	82.03 ±0.06	0.42 ±0.08	983.33 ±0.00
HH_H2	16.50 ±0.00	81.80 ±0.10	0.72 ±0.03	1247.56 ±0.00
HH_H3	15.80 ±0.00	82.43 ±0.06	0.44 ±0.13	1146.19 ±0.00
HH_H4	16.50 ±0.00	81.80 ±0.10	0.46 ±0.09	1151.17 ±0.00
HH_H5	16.90 ±0.00	81.30 ±0.10	0.58 ±0.12	925.12 ±0.00
HH_H6	15.90 ±0.00	82.30 ±0.10	0.42 ±0.00	1316.35 ±0.00
HH_H7	16.30 ±0.00	81.90 ±0.10	0.36 ±0.00	920.45 ±0.00
HH_H8	15.90 ±0.00	82.27 ±0.12	0.41 ±0.05	652.13 ±0.00
HH_H9	16.10 ±0.00	82.10 ±0.00	0.51 ±0.13	828.18 ±0.00
HH_H10	15.60 ±0.00	82.60 ±0.10	0.60 ±0.16	723.22 ±0.00
HH_H11	15.70 ±0.00	82.53 ±0.15	0.46 ±0.12	1142.93 ±0.00
HH_H12	16.50 ±0.00	81.80 ±0.10	0.61 ±0.15	571.91 ±0.00
HH_H13	16.70 ±0.00	81.53 ±0.06	0.79 ±0.01	905.14 ±0.00
HH_H14	17.10 ±0.00	81.23 ±0.06	0.49 ±0.03	982.02 ±0.00
HH_O1	16.90 ±0.00	81.33 ±0.06	0.59 ±0.10	1045.28 ±0.00

4 Conclusions

Consumers in every region of the world couldn't be sure about the safety of honey types due to changes in the honey processing, production and distribution processes, and these problems arising from honey are monitored more carefully by official authorities. In this context, 95 honey samples were analyzed under laboratory conditions using honey quality-control methods recommended in the literature. It was concluded that the analyzed samples basically provide the desired quality standards. Moreover, the results obtained for the physical properties and proline content, indicate that most of the honeys have good quality grades, good freshness and ripeness, sufficient processing. It is obvious that the present study will contribute to researches based on honey safety.

Acknowledgements

The research was financially supported by the project with a number of 2200089 (TUBITAK 1002).

Conflict of interest

All authors declare that they have no further conflict of interest.

iThenticate: %17

References

- [1] S. Das, M. N. Uddin, M. S. Haque, D. Chakraborty, M. Mostafa, A. Hasnaine, S. Das and M. Uddin, Hydroxymethylfurfural content and sugar profile of honey available in Bangladesh Using Validated HPLC-PDA and HPLC-RID. *Journal of Food Quality and Hazards Control*, 9, 160-168, 2022. <https://doi.org/10.18502/jfqhc.9.3.11154>.
- [2] O. Elhamdaoui, A. El Orche, A. Cheikh, B. Mojemmi, M. Nejjari and Bouatia, Development of fast analytical method for the detection and quantification of honey adulteration using vibrational spectroscopy and chemometrics tools. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8816249>.
- [3] M. Özgüven, E. Demircan and B. Özçelik, Determination of physicochemical properties of flower honeys produced in various locations and their compliance with the Turkish food codex. *European Journal of Science and Technology*, 20, 321-326, 2020. <https://doi.org/10.31590/ejosat.758399>.
- [4] E. Spilioti, M. Jaakkola, T. Tolonen, M. Lipponen, V. Virtanen, I. Chinou and P. Moutsatsou, Phenolic acid composition, antiatherogenic and anticancer potential of honeys derived from various regions in Greece. *Plos One*, 9(4), 2014. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094860>.
- [5] C. Mutlu, M. Erbaş and S. A. Tontul, Some properties of honey and other bee products and their effects on human health. *Academic Food*, 15(1), 75-83, 2017. <https://doi.org/10.24323/akademikgida.306074>.
- [6] N. Özmen and E. Alkın, The antimicrobial features of honey and the effects on human health. *Uludağ Bee Journal*, 6(4), 155-160, 2006.
- [7] I. Demir, A. M. Keser, M. K. Altunoğlu, S. Akpınar and G. E. Akdoğan, Characteristic features of Kolludere Valley (Bitlis-Hizan) Honey. *Yuzuncu Yil University Journal of Agricultural Sciences*, Volume: 34, Issue: 1, 2024. <https://doi.org/10.29133/yyutbd.1306890>.
- [8] G. Yetkin, S. Kundakçı, E. D. Kanbur, K. Coskunçelebi and S. Makbul, Melissopalynological and Physicochemical properties of Cimil Plateau (Rize) Honey, *Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering*, 4(1), 51-64, 2023. <https://doi.org/10.53501/rteufemud.1209594>.
- [9] M. Moniruzzaman, I. Rodríguez, M. Ramil, R. Cela, S. Sulaiman and S. Gan, Assessment of gas chromatography time-of-flight accurate mass spectrometry for identification of volatile and semi-volatile compounds in honey. *Talanta*, 129, 505- 515, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.06.019>.
- [10] A. Islam, I. Khalil, N. Islam, M. Moniruzzaman, A. Mottalib, S. A. Sulaiman and S. H. Gan, Physicochemical and antioxidant properties of Bangladeshi honeys stored for more than one year. *BMC Complementary and Alternative Medicine*,

- 12(1), 177, 2012. <https://doi.org/10.1186/1472-6882-12-177>.
- [11] C. Acquarone, P. Buera and B. Elizalde, Pattern of pH and electrical conductivity upon honey dilution as a complementary tool for discriminating geographical origin of honeys. *Fd Chem.*, 101, 695-703, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.01.058>.
- [12] M. Lewoyehu and M. Amare, Comparative assessment on selected physicochemical parameters and antioxidant and antimicrobial activities of honey samples from selected districts of the Amhara and Tigray regions, Ethiopia. *International Journal of Food Science*, 1-10, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/4101695>.
- [13] A. Gela, Z. A. Hora, D. Kebebe and A. Gebresilassie, Physico-chemical characteristics of honey produced by stingless bees (*Meliponula beccarii*) from West Showa zone of Oromia Region, Ethiopia. *Heliyon*, 7(1), e05875, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05875>.
- [14] M. S. A. S. S. Sabir and M. Y. Mohammed, Evaluation of physico-chemical properties of honey samples collected in Erbil/Iraq, 2011. ISSN: 2313-5727. <http://journals.ebu.edu.iq/index.php/polytechnic>.
- [15] P. Oddo and R. Piro, Main european unifloral honeys: descriptive sheets. *Apidologie*, 35, 38-81, 2004. <https://doi.org/10.1051/apido:2004049>.
- [16] S. Bogdanov, K. Ruoff and L. P. Oddo, Physico-chemical methods for the characterization of unifloral honeys. *Apidologie*, 35, 4-17, 2004. <https://doi.org/10.1051/apido:2004047>.
- [17] M. J. Sereia, P. H. Março, M. R. G. Perdoncini, R. S. Parpinelli, E. G. Lima and F. A. Anjo, Techniques for the evaluation of physicochemical quality and bioactive compounds in honey. In V.A.A. Toledo (Ed.), *Honey analysis* (p. 193-214). IntechOpen, 2017. <http://doi.org/10.5772/66839>.
- [18] S. Bogdanov, and P. Martin, Honey authenticity: a review. *Mitteilungen aus Lebensmitteluntersuchung und Hygiene*, 93, 232-254, 2002.
- [19] L. A. Marghitaş, D. Dezmirean, O. Popescu, O. Maghear, A. Moise and O. Bobiş, Correlation between ash content and electrical conductivity in honeydew honey from Romania. 1st World Honeydew Honey Symposium, Tzarevo, Bulgaria, 30, 2008.
- [20] O. Kasırga, Determination of physical and biochemical properties of honey produced in Şırnak region. Master thesis, Bayburt University Institute of Science, Bayburt, 29-37, 2019.
- [21] S. Bogdanov, Harmonised methods of the international honey commission, pp. 1-62, 2002.
- [22] F. N. Başoğlu, K. Sorkun, M. Löker, C. Doğan C. and H. Wetherilt, Saf ve sahte balların ayırt edilmesinde fiziksel, kimyasal ve palinolojik kriterlerin saptanması, *Gıda*, 21, 2, 67-73, 1996.
- [23] T.S.E. Turkish Food Codex Honey Communiqué (Communiqué No: 2020/7), Date of Official Gazette: 22.04.2020 Number of Official Gazettes: 31107, Turkish Standardization Institute, Ankara, 2020.
- [24] TS-13365, Determination of Water Content in Honey, Turkish Standardization Institute, Ankara, 2008.
- [25] AOAC, Official methods of analysis, (Editör: Helrich, K.), Association of Official Analytical Chemists. (15th edn), Arlington, VA., 1990.
- [26] TS-13366, Determination of Electrical Conductivity in Honey, Turkish Standardization Institute, Ankara, 2008.
- [27] TS-13357, Determination of Proline Content in Honey, Turkish Standardization Institute, Ankara, 2008.





TinyML tabanlı görsel işitsel anahtar kelime tespiti

TinyML based audio visual keyword detection

Mehmet Tosun^{1,*} , Hamit Erdem² 

^{1,2} Başkent Üniversitesi, Elektrik & Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06790, Ankara Türkiye

Öz

Anahtar kelime tespiti (AKT), makine öğreniminin kullanıldığı alanlardan birisidir. Amacı, ses veya görüntü verisinden belirli kelime veya objenin otomatik tespit edilmesidir. Taşınabilir yapay zekâ uygulamalarının artmasıyla beraber, bu alanda da uygulamalar artmaktadır. Özellikle AKT uygulamalarının etkinliğini artırmak için hibrit sistemler (ses ve görüntünün birlikte kullanımı) üzerinde çalışma yapılmaktadır. Bu sistem ile birlikte iki farklı kanaldan algılanan ses ve görüntü komutlarının birleştirilmesi amaçlanmaktadır. Bilgisayar (PC) ortamında görsel işitsel AKT üzerinde birçok çalışma yapılmış ve iyi sonuçlar elde edilmiştir. Diğer taraftan derin öğrenme uygulamalarını düşük kapasiteli işlemciler üzerinde gerçekleştirmek için TinyML (Düşük Kapasiteli Makine Öğrenmesi) kapsamında çalışmalar yapılmaktadır. Bu uygulamalarda, derin öğrenmeye yönelik geliştirilen modelin parametrelerini azaltarak (nicelleştirme, kırpma) sıradan mikrodenetleyici üzerinde uygulama imkânı oluşturmaktadır. Bu çalışmada ses ve görüntü verisi kullanılarak, TinyML alanında AKT uygulaması önerilmiştir. Önerilen hibrit modelin eğitiminde öncelikle ses ve görüntü modelleri Edge Impulse yazılım ortamında ayrı ayrı eğitilmiştir. Geliştirilen MobileNetV2 ve CNN tabanlı modeller ESP32-CAM ve Arduino Nano BLE geliştirme kitlerine yüklenerek, denenmiştir. Daha sonra modeller doğrusal ağırlıklı birleştirme metodu ile birleştirilerek denenmiştir. Sistemin başarısı standart ölçütlere göre test edilmiştir. Deneysel sonuçlarda doğruluk ölçütüne göre, sadece ses tabanlı AKT başarısı %85, sadece görüntü tabanlı AKT başarısı %85 olurken, görsel işitsel hibrit uygulamasında sınıflandırma başarısı %90 civarında olmuştur.

Anahtar kelimeler: TinyML, Makine öğrenimi, Anahtar kelime tespiti, Evrişimsel sinir ağları, Edge impulse

1 Giriş

Günümüzün hızla dijitalleşen dünyasında yapay zekâ ve derin öğrenme, teknoloji alanında devrim niteliğinde ilerlemeler sağlayarak pek çok sektörde köklü değişikliklere yol açmaktadır. Yapay zekâ, karmaşık problemleri çözmeye, büyük veri setlerinden anlamlı sonuçlar çıkarma ve insan benzeri kararlar alabilme yetenekleriyle öne çıkarken, derin öğrenme bu yetenekleri daha da ileriye taşıyan bir alt dal olarak kendini göstermektedir [1]. Bu alandaki ilerlemeler,

Abstract

Keyword detection (KWD) is one of the areas where machine learning is used. Its purpose is the automatic detection of specific words or objects from audio or image data. As portable artificial intelligence applications become more prevalent, the number of applications in this field is also growing. In particular, hybrid systems (the use of audio and video together) are being studied to increase the effectiveness of KWD applications. The system aims to combine audio and visual commands detected through two different channels. Extensive work has been done on audiovisual keyword detection in a computer environment, yielding good results. On the other hand, efforts are being made within the scope of TinyML (Low-Power Machine Learning) to implement deep learning applications on low-capacity processors. In these applications, reducing the parameters of the deep learning model (quantization, pruning) makes it possible to implement the model on ordinary microcontrollers. In this study, a keyword detection application in the field of TinyML is proposed using audio and visual data. In the training of the proposed hybrid model, the audio and visual models were first trained separately in the Edge Impulse software environment. Developed MobileNetV2 and CNN-based models were loaded onto ESP32-CAM and Arduino Nano BLE development kits and tested. Subsequently, the models were combined using a linear weighted fusion method and tested. In the experimental results, according to the accuracy criterion, the success rate of the audio-based KWD was 85%, the success rate of the image-based KWD was 85%, while the classification success in the audiovisual hybrid application was around 90%.

Keywords: TinyML, Machine learning, Keyword spotting, Convolutional neural network, Edge impulse

birçok sektörde devrim yaratma potansiyeline sahiptir. Özellikle son yıllarda, derin öğrenme algoritmalarındaki iyileşmeler sayesinde, makine öğrenmesi modelleri giderek daha insan benzeri zekâ sergilemeye başlamıştır.

Makine öğrenimi, bilgisayar sistemlerinin, açık bir programlama olmadan öğrenme ve performanslarını iyileştirme yeteneği olarak tanımlanabilir [2]. Bu teknoloji, büyük miktardaki veriden kalıplar ve eğilimler tespit ederek, sistemlerin çeşitli görevleri daha etkin bir şekilde yerine getirmesine olanak sağlar. Son yıllarda, makine öğrenmesi

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mehmet_tsn.96@outlook.com (M. Tosun)
Geliş / Received: 11.05.2024 Kabul / Accepted: 30.07.2024 Yayımlanma / Published: 15.10.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1482481

yöntemleri hızla gelişmiş ve birçok yeni uygulama alanı ortaya çıkmıştır. Bunlardan biri de TinyML'dir.

TinyML, makine öğrenmesi modellerinin mikro-kontrolörler dahil olmak üzere düşük işlemci gücüne ve hafızaya sahip cihazlarda çalıştırılmasını ifade eder [3]. Genellikle 1 miliwatt veya daha az enerji tüketimi olan cihazlarda kullanılan bu modeller, her yerde bulunan cihazları ve fiziksel dünyayı daha akıllı hale getirebilir [4]. Literatürde yeni bir yaklaşım olan TinyML teknolojisi birçok araştırmacı tarafından da incelenmektedir.

Altayeb ve arkadaşları (2023), çalışmalarında Edge Impulse platformunu kullanarak bir SiPM mikro radyasyon sensörü ve TinyML ile otomatik bir gama radyasyon algılama ve tanımlama sistemi tasarlamışlardır. Çalışmalarında kullanılan model, gerçek gama kaynağı verileri kullanılarak eğitilmiştir. Model olarak CNN kullanılmıştır. Yapılan testler sonucunda gerçek zamanlı işlemde %90 doğruluk elde etmişlerdir [5]. Mansoureh (2021), çalışmasında çamaşır makinesinin arıza tespiti için TinyML kullanmıştır. Donanım olarak Arduino Nano 33 BLE kullanmıştır ve Arduino bir çamaşır makinesine montaj edilmiştir. Kartta bulunan ivme sensörü çamaşır makinesi verileri ile arıza tespit çalışması yapmıştır. Çalışmada eğitim modeli olarak CNN kullanılmıştır. Çalışmasında %92'lik başarı elde etmiştir [6]. GRAU (2021), çalışmasında TinyML teknolojisine genel bir bakış yapıp, Arduino 33 Ble ile anahtar kelime tespiti yapmıştır. Çalışmasında yes ve no işitsel verileri ile anahtar kelime tespiti üzerinde çalışmıştır. Eğitim modeli olarak CNN kullanmıştır. Sonuç olarak modelde %94 eğitim doğruluğu elde edilmiştir [7].

TinyML teknolojisinin kullanım alanlarından birisi de anahtar kelime tespit işlemidir. AKT, konuşulan cümleleri veya metin parçalarını analiz ederek belirli anahtar kelimeleri otomatik olarak algılayan bir uygulamadır [8]. Önceki çalışmalar genellikle işitsel tabanlı anahtar kelime tespiti üzerine odaklanmıştır [9,10]. Ancak bu yaklaşımlar gürültülü ortamlarda başarı sağlamada zorluklar yaşatabilmektedir.

Görsel işitsel anahtar kelime tespiti hem görüntü hem de işitsel verilerini birlikte analiz ederek, sadece işitsel verilerine dayanan geleneksel anahtar kelime tespitinden daha yüksek doğruluk ve güvenilirlik sağlamaktadır. Görsel işitsel anahtar kelime tespiti uygulamaları bilgisayar tabanlı başarılı uygulamalar olmasına rağmen, mikrodenetleyici tabanlı TinyML uygulamalarında yapılmamıştır.

Bu çalışmada TinyML kullanarak görsel işitsel anahtar kelime tespit çalışması yapılmıştır. Çalışmada sırasıyla aşağıdaki işlemler uygulanmıştır.

- Ses ve görsel ifadeler için ayrı ayrı veri seti kullanılmıştır. Ses verileri için Yes-No, görsel veriler için Açık El- Kapalı El veri seti kullanılmıştır.
- Ses ve görüntü modelleri Edge Impulse uygulama programında ayrı ayrı eğitilerek, işlemcilerle yüklenmiş ve test edilmiştir.
- Hibrit uygulamanın başarısını izlemek için PC ortamında GUI geliştirilmiştir. Ses ve görüntü tabanlı AKT sonuçlarının birleştirilmesinde doğrusal ağırlıklı birleştirme yapılmıştır.

2 Materyal ve metot

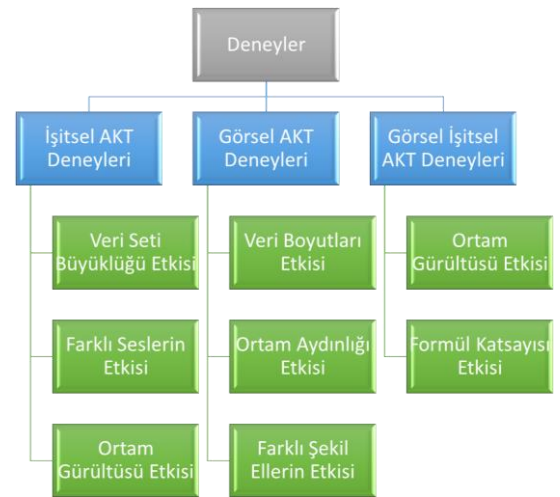
Önerilen çalışmada AKT uygulamasının etkinliğini artırmak için AKT uygulamasında başarılı olan hibrit uygulamanın, TinyML uygulaması olarak gerçekleşmesi üzerinde bir çalışma yapılmıştır. TinyML uygulamalarına uygun olacak şekilde veri setleri kullanılmıştır. Gerçekleştirilen derin öğrenme tabanlı uygulamada TinyML'e uygun model ve donanımlar kullanılmıştır. Modeller Edge Impulse uygulama programında eğitilip, optimizasyon ve kırpma yapılarak donanımlarda çalışmaya hazır hale getirilmiştir.

Şekil 1'de AKT modellerine yapılan deneyler gösterilmektedir. Deneylerdeki amaç görsel AKT ve işitsel AKT modellerinin tek başına değişen fiziksel koşullardaki performansını gözlemlemektir. Daha sonrasında hibrit modelinde performansı test edilip sonuçları karşılaştırarak hibrit modelin başarısını gözlemlemektir.

İşitsel AKT deneyleri 3 aşamada yapılmıştır. Öncelikle veri seti büyüklüğüne göre modelin doğruluk performansı ve aşırı öğrenme (overfitting) durumu gözlemlenmiştir. Daha sonrasında veri setinde olmayan insan sesleriyle model test edilmiştir. Son olarak gürültülü ortamlarda işitsel AKT'nin başarısı gözlemlenmiştir.

Görsel AKT deneylerinde ilk olarak görsel verilerin boyutlarının bellek kullanımı, doğruluk gibi parametre etkisi gözlemlenmiştir. Daha sonrasında ortam aydınlığının modelin performansına etkisi gözlemlenmiştir ve son olarak veri setinde bulunmayan farklı el şekillerinin model performansına etkisi gözlemlenmiştir.

Görsel işitsel AKT deneylerinde ise Denklem (5) 'de verilen doğrusal birleştirme yöntemiyle oluşturulan hibrit modelin formül katsayısı ve gürültülü ortamdaki performansı gözlemlenmiştir.

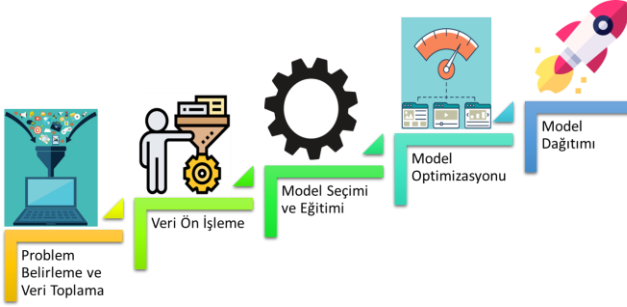


Şekil 1. Çalışmada yapılan deneyler

2.1 TinyML

Geleneksel makine öğrenmesi algoritmalarının aksine, TinyML modelleri çok daha az bellek ve işlem gücü kullanarak çalışabilmektedir. TinyML modellerini cihazlarda etkin bir şekilde çalıştırmak için tasarlanmış birçok platform bulunmaktadır.

Edge Impulse, TinyML uygulamalarını geliştirmek için kullanılan popüler bir platformdur. Bu platform, kullanıcılara veri toplama, model eğitimi, optimizasyon ve cihaza derleme gibi tüm TinyML geliştirme aşamalarını tek bir çatı altında sunar. Bu sayede, geliştiriciler kolayca TinyML uygulamaları oluşturabilir ve ürettikleri ürünlere akıllı özellikleri entegre edebilirler. Şekil 2’de TinyML akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 2. TinyML ile model oluşturmadaki akış şeması

TinyML’de eğitim süreci, büyük ölçekli makine öğrenimi uygulamalarından farklıdır. Eğitim işlemi genellikle yüksek performanslı bir bilgisayarda gerçekleştirir ve daha sonra bu eğitilmiş model, bir mikrodenetleyici gibi bir hedef cihazda çalıştırılmak üzere optimize edilir [11].

TinyML, düşük güç tüketimi, sınırlı bellek ve işlem kapasitesi gibi zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır. Bu nedenle, TinyML’de optimizasyon süreci çok önemlidir. Optimizasyon süreci, TinyML modelinin performansını ve verimliliğini artırmak için yapılan bir dizi adımdan oluşur.

Nicelleştirme, TinyML’de genellikle modelin boyutunu küçültmek ve hızını artırmak için kullanılan bir optimizasyon tekniğidir [12]. Spesifik olarak, modelin ağırlıklarının hassasiyetini azaltarak ve daha az dahili hafıza kullanarak çalışmasına olanak tanır. Büyük veri merkezlerinde çalışırken, model ağırlıkları genellikle 32 bitlik kayan nokta değerleri (float32) olarak saklanır. Ancak bu, donanımsal olarak düşük cihazlarda (örneğin cep telefonu veya mikrokontrolcüde) gereğinden fazla hassasiyet olabilir ve gereksiz yer kaplar. Nicelleştirme, bu ağırlıkları daha düşük hassasiyetli bir biçime (örneğin int8 veya uint8) dönüştürerek modelin hafızada kapladığı alanı önemli ölçüde azaltabilir.

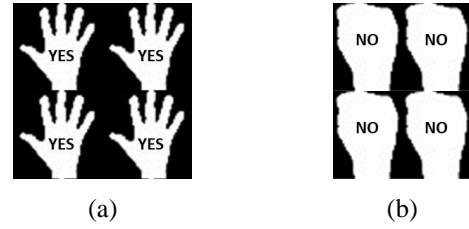
2.2 ESP32-CAM modülü ile görsel anahtar kelime tespiti

Görsel anahtar kelime tespiti, belirli görsel desenleri veya nesnelere tanımlama sürecidir. Görsel AKT işleminde kamera sürekli olarak görüntü yakalar ve bu görüntüler model tarafından analiz edilir. Model, belirlenen nesneyi tespit ettiğinde bir sinyal göndererek tespiti sağlar.

Bu çalışmada görsel verilerden yararlanarak AKT işlemi ESP32-CAM modülü ile yapılmıştır. ESP32-CAM, bir ESP32 WiFi modülü içeren ve dahili bir video kamera barındıran bir geliştirme kartıdır.

2.2.1 Görsel anahtar kelime tespitinde veri toplama

Klasik bir makine öğreniminde olduğu gibi TinyML ile de bir model oluştururken ilk yapılan işlem modelin veri setini hazırlamaktır. Bu çalışmada görsel veri olarak Hand Gesture Recognition Dataset kullanılmıştır [13]. Bu veri setinde 20 farklı el hareketinden 24000 görüntü mevcuttur. Her sınıf için 900 eğitim verisi 300 test verisi bulunmaktadır. Veriler %75 eğitim, %25 test verileri olacak şekilde ayrılmıştır. Bu çalışmada, 2 farklı el durumu (açık el, kapalı el) ile tespit yapılmıştır. Şekil 3’de çalışmada kullanılan el hareketleri gösterilmiştir. İlerleyen bölümlerde açıklandığı gibi açık el hareketi YES sesi ile kapalı el hareketi ise NO sesi ile birlikte kullanılmıştır.



Şekil 3. Veri setinde kullanılan el hareketleri (a) açık el hareketi ve (b) kapalı el hareketi

2.2.2 Görsel anahtar kelime tespitinde dürtü tasarımı

TinyML uygulamalarında veri seti oluşturma işleminden sonra dürtü tasarımı yapılmaktadır. Dürtü tasarımı, veri setinden alınan verileri işleyip özellikler çıkarmak ve yeni verileri sınıflandırmak için bir makine öğrenimi akışı oluşturmaya yarar. Dürtü tasarımında Edge impulse platformunda açıklanan bloklardaki parametreler girilir, daha sonrasında veri setindeki veriler siyah skalaya çevrilir. Siyah skalaya çevirme işlemi modelin daha hafif olmasını sağlar.

Bu çalışmada Transfer Learning tekniği ile veriler işlenmiştir. Eğitim mimarisi olarak MobilenetV2 kullanılmıştır. MobileNets, mobil ve gömülü cihazlarda hafif ve hızlı derin öğrenme modeli olarak kullanılmak üzere tasarlanmış bir mimaridir. Bu mimari, geleneksel derin sinir ağlarının (DNN) hesaplama yoğunluğunu azaltarak ve parametre sayısını düşürerek, daha küçük boyutlu ve daha hızlı çalışan modeller elde etmeyi hedefler. MobileNet, "depthwise separable convolution" olarak bilinen bir yapı kullanır [14].

Modelin dürtü tasarımı ve ardından eğitim mimarisi ile eğitimi sonucunda bir karışıklık matrisi (confusion matrix) verilmektedir. Şekil 4’de görsel AKT için karışıklık matrisi verilmiştir.

		GERÇEK	
		AÇIK EL	KAPALI EL
TAHMİN	AÇIK EL	100%	0%
	KAPALI EL	0%	100%
	F1 SKORU	1.00	0

Şekil 4. Görsel AKT eğitimi sonrası edge impulse’da hesaplanmış karışıklık matrisi

F1 skoru, bir modelinin performansını ölçen bir metriktir. Hassasiyet ve geri çağırma parametrelerinin harmonik ortalaması olarak hesaplanır. **Denklem (1)** hassasiyet hesaplamasını göstermektedir. Hassasiyet, modelin pozitif olarak tahmin ettiği örneklerin gerçekten pozitif olma oranını ifade etmektedir.

$$\text{Hassasiyet} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (1)$$

Geri çağırma, gerçek pozitif örneklerin ne kadarının doğru bir şekilde tanındığını ifade etmektedir. **Denklem (2)** geri çağırma hesaplamasını göstermektedir.

$$\text{Geri Çağırma} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

Denklem (1) ve **Denklem (2)**'deki TP, gerçek pozitif örneklerin doğru bir şekilde pozitif olarak tahmin edilmesi anlamına gelmektedir. FP, gerçek negatif örneklerin yanlış bir şekilde pozitif olarak tahmin edilmesini göstermektedir. FN, gerçek pozitif örneklerin yanlış bir şekilde negatif olarak tahmin edilmesini göstermektedir. F1 skoru, **Denklem (3)**'de gösterilmiştir.

$$F1 = 2 \times \frac{\text{Hassasiyet} \times \text{Geri Çağırma}}{\text{Hassasiyet} + \text{Geri Çağırma}} \quad (3)$$

F1 skoru, 0 ile 1 arasında bir değer alır. 1, en iyi performansı temsil ederken, 0 en kötü performansı temsil eder.

2.2.3 Görsel anahtar kelime tespitinde dağıtım

Dağıtım işlemi, modelin cihazlarda yerel olarak çalıştırmasını sağlamak için gerekli olan adımları içerir. Edge Impulse, makine öğrenim modellerinin boyutunu ve hesaplama maliyetini azaltmak için nicelme tekniğini kullanır. **Tablo 1**'de nicelme tekniği ile optimize edilmiş ve edilmemiş modelin farkları gösterilmektedir.

Tablo 1. Görsel AKT'de optimizasyon sonucu edge impulse tarafından hesaplanan değerler

Teknik	RAM (kByte)	Flash RAM (kByte)	Gecikme Süresi (ms)
Nicelme Uygulanmış	170.4	584.5	809
Nicelme Uygulanmamış	236.7	1600	1704

Model gerçek zamanlı çalışarak el hareketlerini algılamaktadır. Modelin çalışması **Şekil 5**'de gösterilmiştir. Modelin çalışmasında 2 sınıf bulunmaktadır. Açık el ve kapalı el hareketi olmayan diğer nesnelere sınıflandırılmamaktadır. Görsel AKT'de bilinmeyen sınıfı yapılmamıştır. Bunun sebebi 3 sınıf olması durumunda bellek kullanımı artarak ESP32-CAM modeli çalıştıramamıştır.



Şekil 5. Görsel AKT modelinin el hareketlerini sınıflandırması

2.3 Arduino nano BLE ile işitsel anahtar kelime tespiti

İşitsel anahtar kelime tespiti, ses girdisinden belirli anahtar kelimelerin otomatik olarak tanınması işlemidir. Bu çalışmada Edge Impulse'da eğitilen işitsel AKT modeli Arduino Nano BLE Sense'de çalıştırılmıştır. Arduino BLE Sense, Bluetooth Low Energy (BLE) bağlantısı ve dahili olarak MP34DT05 model bir mikrofon içermektedir. Arduino Nano BLE sense, bir 32-bit Arm cortex-M4 işlemci barındırmaktadır.

2.3.1 İşitsel anahtar kelime tespitinde veri toplama

İşitsel AKT'de 3 farklı veri seti kullanılmıştır. İlk veri seti, Google tarafından hazırlanmış olan Yes-No veri setidir [15]. Veri seti yüzlerce farklı kişiden alınan ses kayıtlarından oluşmaktadır. Her bir kelime 1 saniyelik verilerle kaydedilmiştir. Veri seti 342 makalede referans gösterilmiştir [16]. **Tablo 2**'de veri setinin farklı modellerdeki doğruluk yüzdeleri gösterilmiştir. Bu modeller bilgisayar ortamında çalıştırılmış ve AKT uygulamalarında kullanılmıştır. Tablonun son satırında ise bu çalışmadaki Edge Impulse tarafından hesaplanan değeri gösterilmektedir.

Tablo 2. Farklı çalışmalarda kullanılan yes-no veri setinin doğruluk değerleri

Model	Doğruluk (%)
TripletLoss-res15 [17]	98,56
BC-ResNet-8 [18]	98
Wav2KWS [19]	97,9
Res 8 [20]	97,8
KWT-3 [21]	97,49
CNN	95

Doğruluk, makine öğreniminde modelin doğru tahmin ettiği örneklerin oranını ifade etmektedir. Doğruluk, **Denklem (4)**'de gösterilmiştir.

$$\text{Doğruluk} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (4)$$

Denklemdaki TN, gerçek negatif örneklerin doğru bir şekilde negatif olarak tahmin edilmesini ifade etmektedir. TP, FP ve FN ifadeleri **Denklem (1)** ve **Denklem (2)**'de açıklanan ifadelerdir.

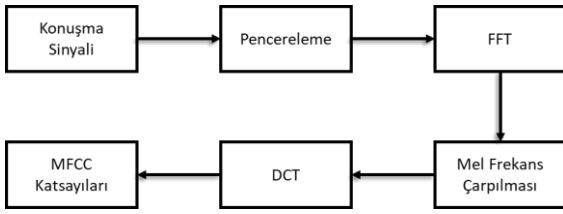
İkinci veri seti ise Microsoft tarafından hazırlanmış olan MS-SNSD veri setidir [22]. MS-SNSD veri seti, arka plan gürültüsünü bastırmak için derin sinir ağları modellerini eğitmek amacıyla hazırlanmıştır. Bu veri seti çalışmadaki gürültü sınıfında kullanılmıştır.

Üçüncü veri seti ise bu çalışma için Edge Impulse platformunda hazırlanmış olan Open Close veri setidir. Çalışmada Arduino Nano geliştirme kartında bulunan MP34DT05 model mikrofon ile 16 kHz örnekleme hızında ses veri seti hazırlanmıştır. Her bir kelime 1 saniye olacak şekilde kaydedilmiştir.

2.3.2 İşitsel anahtar kelime tespitinde dürtü tasarımı

İşitsel AKT'de dürtü tasarımı adımı, görsel AKT'da olduğu gibidir. İşitsel AKT işleminde, ses sinyalleri dijital bir yapıya dönüştürülüp işlenmektedir.

Mel-Frekanslı Kepstrum Katsayıları (MFCC), ses sinyallerinin spektral özelliklerini temsil etmek için kullanılan ve insan kulağının frekans algılamasını taklit eden bir gösterim şeklidir. Bu, MFCC'yi konuşma tanıma, ses sentezi, hoparlör doğrulama ve müzik bilgi alma gibi birçok alanda en iyi özelliklerden biri haline getirir. MFCC literatürde de anahtar kelime tespit çalışmalarında kullanılmaktadır [23].



Şekil 6. MFCC yapısının blok şeması

Şekil 6'da gösterilen blok şemasında, öncelikle ses sinyalleri analogdan dijitala dönüştürülür. Örnekleme hızı ve bit derinliği belirlenir. Ses sinyali kare pencereler halinde bölünür. Pencerelerin uzunluğu ve örtüşme miktarı belirlenir. Daha sonrasında her pencereye FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) uygulanır. FFT'nin çıktısı, frekans bileşenlerinin genliklerini ve frekanslarını içeren bir spektrumdur. Spektrum, insan işitme sistemine daha yakın bir frekans temsili elde etmek için Mel ölçeği kullanılarak yeniden örnekleme edilir. Mel ölçekli spektrumun DCT (Discrete Cosine Transform)'si hesaplanır. DCT'nin ilk birkaç katsayısı, MFCC'leri oluşturur. En önemli MFCC'ler seçilir. Seçilen MFCC'ler, ses sinyalinin sınıfını tahmin etmek için kullanılır.

İşitsel anahtar kelime tespitinde, MFCC ile ses özellikleri çıkarılıp eğitim modeli olarak tek katmanlı CNN yapısı kullanılmıştır. Eğitim sonucunda karışıklık matrisi Şekil 7'de gösterilmiştir.

		GERÇEK		
		NO	GÜRÜLTÜ	YES
TAHMIN	NO	99.2%	0%	0.8%
	GÜRÜLTÜ	1.4%	98.2%	0.5%
	YES	0.4%	1.6%	98.0%
F1 SKORU		0.99	0.98	0.98

Şekil 7. İşitsel AKT eğitimi sonrası edge impulse'da hesaplanmış karışıklık matrisi

2.3.3 İşitsel anahtar kelime tespitinde dağıtım

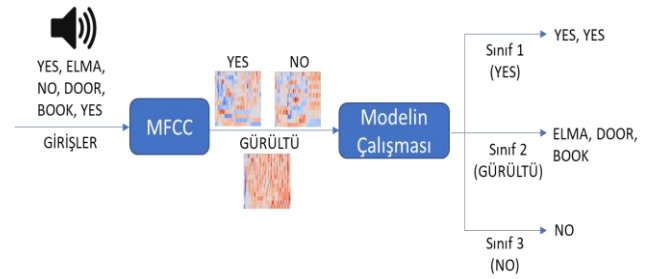
Dağıtım işleminde Edge Impulse bir kütüphane dosyası olarak model çıktısını vermektedir. Bu kütüphane Arduino IDE programına eklenerek kod cihaza yüklenir. Görsel

AKT'de olduğu gibi işitsel AKT için niceleme işlemi Tablo 3'de gösterilmiştir.

Tablo 3. İşitsel AKT'de optimizasyon sonucu edge impulse tarafından hesaplanan değerler

Teknik	RAM (kByte)	Flash (kByte)	RAM	Gecikme Süresi (ms)
Niceleme Uygulanmış	13	35.7		340
Niceleme Uygulanmamış	28.5	39.4		981

Model gerçek zamanlı çalışarak sesleri sınıflandırmaktadır. Ses sınıflandırmada 3 sınıf bulunmaktadır. Ses verileri görsel verilere göre daha az yer kapladığı için bu model 3 farklı sınıfı sınıflandırmaktadır. Modelin çalışması Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. İşitsel AKT modelinin sesleri sınıflandırması

2.4 Görsel işitsel anahtar kelime tespiti

Görsel-ışitsel anahtar kelime tespiti hem görsel hem de işitsel verilerden anahtar kelimeleri otomatik olarak çıkarma ve tanımlama işlemidir. Gürültülü ortamlarda anahtar kelime tespiti yapılması gereken durumlarda kullanılmaktadır. Görsel işitsel anahtar kelime tespiti, makine öğreniminde önemli ve zorlu bir araştırma konusudur. Bu hibrit modeller her iki veri kaynağının sunduğu özellikleri kullanarak daha güçlü ve güvenilir tahminler yapabilir.

Xu ve arkadaşları (2021), uzak alanlarda kelime tespitinin çevresel sağlamlığını iyileştirmek için hem ses hem de görsel bilgiden yararlanarak bir model geliştirmişlerdir. Çalışmada ilk başta çoklu mikrofon sesini ele alıp ses özelliklerini çıkarmak için WPE (Weighted Prediction Error) kullanılmıştır. Görsel verilerin özellik çıkarımı için ROI (Region of Interest) metodu kullanılmıştır. Ardından çok katmanlı CNN ile modeller eğitilmiştir. Modeller doğrusal ağırlıklı birleştirme yapıldıktan sonra %91 doğruluk elde edilmiştir [24].

Bu makede, Xu ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmayı referans alınarak ses için Yes-No ve görüntü için Hand Gesture Recognition Dataset kullanılarak önerilen formül üzerinden modeller birleştirilmiştir. Ayrıca Xu ve arkadaşları bu çalışmayı bilgisayar ortamında yapmışken mevcut çalışma Arduino Nano BLE sense ve ESP32-CAM modüllerinde yapılmıştır.

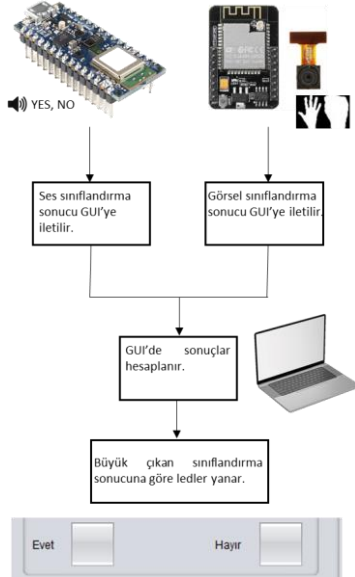
Donanımlardan ayrı ayrı alınan sonuçlar Denklem (5) kullanılarak doğrusal ağırlıklı birleştirme yapılmıştır.

$$y = (w_a \times y_a) + (w_b \times y_b) \quad (5)$$

Denklemdaki w_a ve w_b ifadeleri ağırlık değerleridir. Ağırlık değerleri olarak referans çalışmada w_a için 0.7 ve w_b için 0.3 önerilmiştir. Ayrıca y_a ses modelinin doğruluğunu ve y_b görsel modelin doğruluğunu temsil etmektedir. Model sonuçları, bu çalışma için tasarlanmış JAVA tabanlı bir grafiksel arayüze aktarılmaktadır. Donanımlar ve bilgisayar arasındaki haberleşme UART ile yapılmaktadır. Şekil 9'da grafiksel arayüz gösterilmektedir.

Şekil 9. Java tabanlı tasarlanan grafiksel arayüz

Görsel AKT sonucu 809 milisaniye aralıkla gelmektedir. İşitsel AKT sonucu ise 340 milisaniye aralıkla gelmektedir. Bu yüzden verilerin sınıflandırılması çıkarım zamanı büyük olan sisteme göre yapılmıştır. Bu işlemde öncelikle ses verisi geldiğinde hafızaya atılıp görsel sonuç beklenmektedir. Görsel sonuç geldiğinde ise sonuçlar Denklem (5) ile hesaplanmıştır. Büyük çıkan doğruluk sonucuna göre ilgili led yanmaktadır.

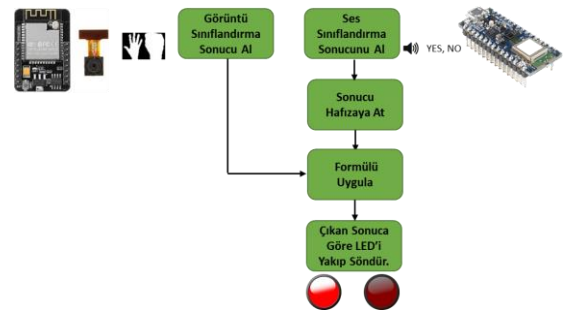


Şekil 10. GUI ortamında görsel işitsel anahtar kelime tespiti modelinin çalıştırılması

Denklem (5) değeri ilgili sınıfta 0.7 (%70) üzeri olduğunda ise ilgili sınıfın ledi ile sonuç gösterilmiştir.

TinyML uygulamaları düşük güç tüketimine ve düşük maliyetli sistemlerde çalışmayı hedeflemektedir. Çalışmanın

bilgisayar ortamından bağımsız bir şekilde de çalışması sağlanmıştır. Burada da öncelikle ses sınıflandırma sonucu alınıp bir hafızaya atılmıştır. Daha sonrasında görsel sınıflandırma sonucuna göre ESP32-CAM modülündeki GPIO14 pini aktif olmaktadır. İlgili sınıflandırma doğruluğu %70 (0,7) üzerinde olduğunda GPIO14 pininden voltaj çıkışı verilmektedir. ESP32-CAM'de açık el hareketi algılandığında GPIO14 pininden 24V çıkış vermektedir. GPIO14 pini Arduino'daki A0 pinine bağlıdır. A0 pini burayı sürekli olarak okumaktadır. Ses sonucu "Yes" olarak algılanıp A0 pininden de 24V okunduğunda Arduino Nano BLE Sense'deki dahili led yanmaktadır. Ses sonucu "No" olarak algılanıp A0 pininden de 0V okunduğunda Arduino Nano BLE Sense'deki dahili led sönmektedir.



Şekil 11. Donanım ortamında görsel işitsel anahtar kelime tespiti modelinin çalıştırılması

3 Bulgular ve tartışma

Bu bölümde, Edge Impulse platformunda geliştirilen ve Arduino IDE ortamında cihazlara yüklenen TinyML modellerinin ayrı ayrı AKT deneyleri ve daha sonrasında tasarlanmış olan GUI üzerinde görsel işitsel AKT deneyleri açıklanmıştır.

3.1 İşitsel AKT deneyleri

İşitsel AKT deneyleri sonucunda gürültülü bir ortamda %85 doğruluk elde edilmiştir.

3.1.1 İşitsel AKT'de veri seti büyüklüğü etkisi

Yapılan çalışmada, değişen veri seti büyüklüğü referans alınarak, doğruluk değeri ve Arduino geliştirme kartı üzerinde yapılan testlerin deneysel doğruluğu gösterilmiştir.

Veri seti olarak Edge Impulse sitesinde Arduino'daki dahili mikrofon ile hazırlanan Open-Close ve hazır olarak alınan Yes-No ile deneyler ayrı ayrı yapılmıştır. Test sütunundaki değer Arduino'dan alınan 20 örnek sonucunda alınan doğruların yüzdesidir. Tablo 4'de Open-Close veri setinin büyüklüğünün test ve doğruluğa etkisi gösterilmektedir. Tablo 5'de Yes-No veri setinin büyüklüğünün test ve doğruluğa etkisi gösterilmektedir.

Tablo 4. Open-Close veri setinin büyüklüğünün doğruluğa etkisi

Eğitim Verisi (Dakika)	Test Verisi (Dakika)	Doğruluk (%)	Test (%)
5	1.25	100	35 (20/8)
10	2.5	100	60 (20/12)
20	5	100	75 (20/15)

Tablo 5. Yes-No veri seti büyüklüğünün doğruluğa etkisi

Eğitim Verisi (Dakika)	Test Verisi (Dakika)	Doğruluk (%)	Test (%)
5	1.25	93.9	55 (20/11)
10	2.5	96.4	80 (20/16)
20	5	98.5	95 (20/19)

Open-Close veri seti 3 farklı insan sesi kullanarak hazırlanmıştır. Yes-No veri seti ise daha profesyonel olarak yüzlerce kişi tarafından Google destekli hazırlanmıştır. Deneylerde Open-Close veri setinin yeterli dengede hazırlanamadığı ve aşırı öğrenme durumu oluşturduğu gözlemlenmiştir. Diğer deneyler daha dengeli ve daha yüksek doğruluk değeri elde ettiği için Yes-No veri seti ile yapılmıştır.

3.1.2 İşitsel AKT'de farklı insan seslerinin etkisi

Bir işitsel AKT modelinin yüksek performans kriterlerinden birisi de farklı seslerde benzer performansı göstermesidir. **Tablo 6**'da 10 farklı insan sesi ile modelin test edilmesini göstermektedir.

Tablo 6. Farklı İnsan Seslerinin Test Doğruluğuna Etkisi

Cinsiyet	Yaş	Test (%)
Erkek	28	95 (20/19)
Kadın	51	90 (20/18)
Erkek	51	85 (20/17)
Erkek	30	95 (20/19)
Erkek	40	90 (20/18)
Erkek	23	90 (20/18)
Kadın	32	95 (20/19)
Erkek	28	90 (20/18)
Kadın	21	95 (20/19)
Kadın	22	95 (20/19)

Görüldüğü gibi sonuçlar benzer çıkararak modelin farklı seslerde de benzer performans verdiği gözlemlenmiştir.

3.1.3 İşitsel AKT'de ortam gürültüsü etkisi

Ortam gürültüleri genel olarak modelin performansını bozan etkilere sahiptir. Yüksek performans gösteren bir modelin ortam gürültüsünde de başarılı bir performans göstermelidir.

Tablo 7. Ortam Gürültüsünün Test Doğruluğuna Etkisi

Ortam Gürültüsü	Test (%)
Beyaz Gürültü	95 (20/19)
Siyah Gürültü	95 (20/19)
Kahve Dükkânı Arka Plan Gürültüsü	85 (20/17)
Mutfak Arka Plan Gürültüsü	90 (20/18)
Boş Laf Gürültüsü	85 (20/17)
Komşu Sesi Gürültüsü	85 (20/17)

Tablo 7'de görüldüğü gibi arka plan gürültüleri doğruluk değerini düşürmüştür. Arka planda insan sesi olan gürültü değerleri diğer gürültülere göre doğruluğu daha azaltmıştır.

3.2 Görsel AKT deneyleri

Görsel AKT deneyleri sonucunda yeterli aydınlığa sahip bir odada %85 doğruluk elde edilmiştir.

3.2.1 Görsel AKT'de veri boyutları etkisi

Görsel verilerin boyutları, model doğruluğu, RAM kullanımı ve çıkarım zamanını etkileyebilir. Büyük boyutlu veriler genellikle daha fazla bilgi sağlar, ancak modelin eğitimi ve dağıtımını için daha fazla bellek ve işlem gücü gerektirebilir.

Tablo 8. Görsel verilerin boyutlarının doğruluk, ram ve çıkarım zamanına etkisi

Genişlik (mm)	Boy (mm)	Doğruluk (%)	RAM (kByte)	Çıkarım Zamanı (ms)
32	32	95	583.4	394
48	48	100	584.5	588
64	64	100	586.5	645
96	96	100	590.6	2231
160	160	100	721.6	4084

Tablo 8'de görüldüğü gibi 48x48 boyutta en iyi sonucu vermiştir. En iyi sonuç en yüksek doğruluk, en düşük RAM kullanımı ve en düşük çıkarım zamanına göre belirlenmiştir. Edge Impulse görüntü verileri için en düşük 32x32 boyutuna izin vermektedir.

3.2.2 Görsel AKT'de ortam aydınlığı etkisi

Ortam aydınlığı görsel AKT'de performansı etkileyen faktörlerden biridir. Ortamın yeterli düzeyde aydınlık olması test performansını olumlu yönde etkilemektedir. **Tablo 9**'da yeterli ve yetersiz ışıklandırılmış bir odada ki görsel AKT performansı gösterilmiştir. Alınan 20 örnek sonucunda doğru sınıflandırmaya göre yüzde belirlenmiştir.

Tablo 9. Görsel AKT'de ortam aydınlığının test doğruluğuna etkisi

Ortam Aydınlığı	Test (%)
Yeterli Işıklandırılmış Oda	85 (20/17)
Yetersiz Işıklandırılmış Oda	70 (20/14)

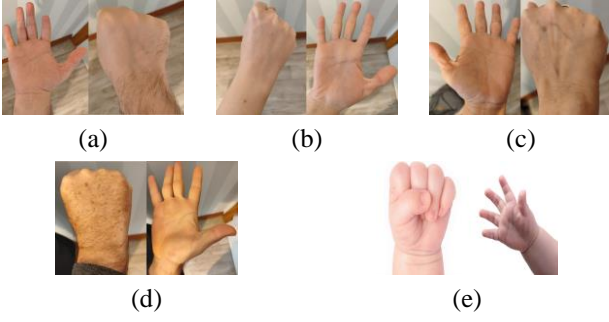
Testler aynı odada yapılmıştır. Yeterli ışıklandırılma, öğle vakti lamba açık bir oda iken, yetersiz ışıklandırılma, akşamüstü lamba açık olmayan bir odadır. Test sütunu, yapılan 20 hareket sonucu doğruluk yüzdesidir.

3.2.3 Görsel AKT'de farklı şekildeki ellerin etkisi

Başarılı bir AKT'de beklenen bir başka durum, farklı boyut ve şekillerdeki ellerde de benzer performansı göstermesidir. **Tablo 9**'da **Şekil 12**'deki (a) eli ile deney yapılmıştır. **Tablo 10**'da ise **Şekil 12**'deki tüm eller ile deneyler yapılmıştır.

Tablo 10. Görsel AKT'de farklı şekildeki ellerin performansı

El Tipi	Test Performansı (%)
(A)	85 (20/17)
(D)	80 (20/16)
(B)	85 (20/17)
(C)	85 (20/17)
(E)	60 (20/12)



Şekil 12. Görsel AKT testlerinde kullanılan eller

Tablo 10’da görüldüğü gibi bebek eli haricinde sonuçlar benzer çıkmıştır. Bebek eli ile yapılan deneylerde test yüzdesi diğer deneylerden düşük çıkmıştır. Bunun sebebi kullanılan veri setinin yetişkin bir el ile hazırlanmasıdır.

3.3 Görsel işitsel AKT deneyleri

Bu bölümde Şekil 9’deki GUI ile görsel işitsel AKT deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerdeki değerlendirme kriteri, görsel işitsel AKT performansının işitsel AKT performansından daha yüksek olmalıdır.

3.3.1 Görsel işitsel AKT’de ortam aydınlığının etkisi

Tablo 11’de farklı ortam şartlarına göre görsel işitsel kelime tespit uygulaması yapılmıştır. Gürültülü ortam, komşu sesi gürültüsü açılmış bir odadır. Yeterli ışıklandırılmış ortam, öğle vakti lamba açık bir odayı temsil ederken, yetersiz ışıklandırılmış ortam akşamüstü lamba kapalı bir odayı temsil etmektedir. Testlerde bazı durumlarda işitsel ve görsel sınıflandırmalar ters yapılmıştır. Örneğin AÇ hareketi yaparken NO sesi söylenmiş veya KAPAT hareketi yaparken YES sesi söylenerek gözlemlenmiştir. Denklem (5) değerleri olarak w_a için 0.7 ve w_b için 0.3 kullanılmıştır.

Tablo 11. Görsel İşitsel AKT’de Ortam Aydınlığının Etkisi

Ortam	Görsel İşitsel Algılama (%)	İşitsel Algılama (%)
Yeterli Işık / Sessiz	95	95
Yeterli Işık / Gürültülü	90	85
Yetersiz Işık / Sessiz	95	95
Yetersiz Işık / Gürültülü	80	85

Testler sonucunda yeterli ışık alan gürültülü bir ortamda görsel işitsel algılama işitsel algılama doğruluğundan yüksek çıkmıştır.

3.3.2 Görsel işitsel AKT’de formül katsayılarının etkisi

Referans çalışmada katsayı değerleri w_a için 0.7 ve w_b için 0.3 kullanılmıştır. Yapılan deneylerde w_a katsayısının daha yüksek olması durumunda daha iyi sonuç verildiği gözlemlenmiştir. Tablo 12’de w_a katsayısının daha yüksek olduğu diğer durumlar gözlemlenmiştir. Ortam olarak gürültülü ve yeterli ışık alan bir ortam tercih edilmiştir. Yapılan deney sonucunda referans çalışmanın önerdiği katsayının en yüksek doğruluk sonucunu verdiği gözlemlenmiştir.

Tablo 12. Görsel işitsel AKT’de farklı katsayıların etkisi

Katsayılar (Denklemler Ağırlıkları)	Görsel İşitsel Algılama (%)	İşitsel Algılama (%)
$w_a = 0,6 - w_b = 0,4$	85	85
$w_a = 0,7 - w_b = 0,3$	90	85
$w_a = 0,8 - w_b = 0,2$	85	85
$w_a = 0,9 - w_b = 0,1$	85	85

4 Sonuçlar

Bu çalışma, TinyML ile görsel ve işitsel AKT sonuçlarının entegrasyonunu ele alarak, görsel işitsel anahtar kelime tespiti konusunda önemli bir katkı sağlamıştır.

Öncelikle görsel ve işitsel AKT modelleri Edge Impulse platformunda eğitilip cihazlarda ayrı ayrı test edilmiştir. Görsel AKT yeterli ışık alan bir odada %85 doğruluk elde ederken, işitsel AKT gürültülü bir ortamda %85 doğruluk elde edilmiştir. Daha sonrasında tasarlanan GUI’de ses ve görüntü komutlarını eş zamanlı olarak alarak, doğrusal ağırlıklı birleştirme yapılmıştır. Görsel işitsel anahtar kelime tespiti ile gürültülü bir ortamda %90 doğruluk sonucu elde edilmiştir.

Çalışma, Xu ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmayı referans olarak farklı veri seti ve eğitim modeli ile gömülü cihazlarda uygulanmıştır. Referans çalışmada hazırlanan veri seti ve kullanılan modeller ile %91 oranında bir başarı sağlamışlardır. Sonuç olarak, modelin küçülmesi ve daha az kapasite kullanmasına rağmen doğruluk sonuçları benzer çıkmıştır. Önerilen yöntemin gerçek zamanlı sistemlerde düşük güç tüketimi ve düşük bellek gereksinimi gibi pratik avantajları, endüstrideki kullanılabilirliğini artırmaktadır.

Çalışmamız, düşük güçlü cihazlarda gerçek zamanlı anahtar kelime tespiti için TinyML’nin potansiyelini göstermektedir. Ancak, gelecekteki çalışmalar için birkaç önemli husus bulunmaktadır. Görsel işitsel yöntemlerin birleştirilmesinin en önemli kullanım alanı robot-insan ve insan makine iletişimi olacaktır. TinyML açısından bu uygulamanın geliştirilmesi küçük robotlar ve taşınabilir cihazlar ve insan iletişimi olabilir. Ayrıca bu çalışmada görsel ve işitsel veriler veri setlerinden ayrı ayrı alınarak fotoğraf ve ses tabanlı çalışmaktadır. İleri çalışmalarda bir videodan otomatik olarak görsel ve işitsel veriler alınarak model çalıştırılabilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %5

Kaynaklar

- [1] J. Tian, The human resources development applications of machine learning in the view of artificial intelligence. IEEE 3rd International Conference, 39-43, 2020. <https://doi.org/10.1109/CCET50901.2020.9213113>.
- [2] M. Rusci and T. Tuytelaars, On-device customization of tiny deep learning models for keyword spotting with few examples. IEEE Micro, 43(6), 50-57, 2023. <https://doi.org/10.1109/MM.2023.3311826>.
- [3] Y. Abadade, A. Temouden, H. Bamoumen, N. Benamar, Y. Chtouki and A. S. Hafid, A comprehensive survey on TinyML. IEEE Access, 11, 96892-96922, 2023. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3294111>.

- [4] P. Warden and D. Situnayake, TinyML machine learning with TensorFlow lite on arduino and ultra-low-power microcontrollers. O'Reilly Media, 2019.
- [5] M. Altayeb, M. Zennaro and E. Pietrosemoli, TinyML gamma radiation classifier. Nuclear Engineering and Technology, 55(2), 443-451, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.09.032>.
- [6] M. Lord, TinyML, anomaly detection. Masters Thesis, California State University, Computer Science, Northridge, USA, 2021.
- [7] M. Monfort Grau, TinyML from basic to advanced applications. Bachelor Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Facultat d'Informàtica de Barcelona, Spain, 2021.
- [8] S. Sadhu and P. K. Ghosh, Low resource point process models for keyword spotting using unsupervised online learning. 25th European Signal Processing Conference, 538-542, 2017. <https://doi.org/10.23919/eusipco.2017.8081265>.
- [9] Z. Tang, L. Chen, B. Wu, D. Yu and D. Manocha, Improving reverberant speech training using diffuse acoustic simulation. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 6969-6973, 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.03988>.
- [10] J. M. Phillips and J. M. Conrad, Robotic system control using embedded machine learning and speech recognition. 19th International Conference on Smart Communities, Improving Quality of Life Using ICT, IoT and AI (HONET), 214-218, 2022. <https://doi.org/10.1109/HONET56683.2022.10019106>.
- [11] H. Han and J. Siebert, TinyML: A systematic review and synthesis of existing research. International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC), 269-274, 2022. <https://doi.org/10.1109/ICAIIIC54071.2022.9722636>.
- [12] N. S. Huynh, S. De La Cruz and A. Perez-Pons, Denial-of-Service (DoS) Attack Detection Using Edge Machine Learning. International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA), 1741-1745, 2023. <https://doi.org/10.1109/ICMLA58977.2023.00264>.
- [13] H. Andrew, Z. Menglong, C. Bo, K. Dmitry, W. Weijun, W. Tobias, A. Marco and A. Hartwig, MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications. Computer Vision and Pattern Recognition, 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1704.04861>.
- [14] Kaggle, Hand Gesture Recognition Dataset. <https://www.kaggle.com/datasets/aryarishabh/hand-gesture-recognition-dataset>, Accessed 14 January 2024.
- [15] W. Pete, Speech commands: A dataset for limited-vocabulary speech recognition. Computation and Language, 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.03209>.
- [16] Papers with code, Speech Commands, <https://paperswithcode.com/dataset/speech-commands>, Accessed 2 February 2024.
- [17] V. Roman and M. Nikolay, Learning efficient representations for keyword spotting with triplet loss. 23rd International Conference SPECOM, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87802-3_69.
- [18] B. Kim, S. Chang, J. Lee and D. Sung, Broadcasted Residual Learning for Efficient Keyword Spotting. Proceedings of INTERSPEECH, 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.04140>.
- [19] D. Seo, H.-S. Oh and Y. Jung, Wav2KWS: Transfer Learning From Speech Representations for Keyword Spotting. IEEE Access, 9, 80682-80691, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3078715>.
- [20] R. Tang, J. Lee, A. Razi, J. Cambre, I. Bicking, J. Kaye and J. Lin, Howl: A Deployed, Open-Source Wake Word Detection System. Computation and Language, 2020, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2008.09606>.
- [21] A. Berg, M. O'Connor and M. Tairum Cruz, Keyword Transformer: A Self-Attention Model for Keyword Spotting. Interspeech, 4249-4253, 2021, <https://doi.org/10.21437/Interspeech.2021-1286>.
- [22] C. Reddy, E. Beyrami, J. Pool, R. Cutler, S. Srinivasan and J. Gehrke, A scalable noisy speech dataset and online subjective test framework. InterSpeech, 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1909.08050>.
- [23] A. Mahmood and U. Köse, Speech recognition based on convolutional neural networks and MFCC algorithm. Advances in Artificial Intelligence Research, 1(1), 6-12, 2021.
- [24] Y. Xu, J. Sun, Y. Han, S. Zhao, C. Mei, T. Guo, S. Zhou, C. Xie, W. Zou, X. Li, S. Zhou, C. Xie, W. Zou and X. Li, Audio-Visual Wake Word Spotting System For MISP Challenge 2021. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 9246-9250, 2021, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.08686>.





Comparison of the accuracy performances of the Gemini Advanced, the GPT-4, the Copilot, and the GPT-3.5 models in medical imaging systems: A Zero-shot prompting analysis

Tıbbi görüntüleme sistemlerinde Gemini Advanced, GPT-4, Copilot ve GPT-3.5 modellerinin doğruluk performanslarının karşılaştırılması: Sıfır atışlı yönlendirme analizi

Alpaslan Koç^{1*} , Ayşe Betül Öztiryaki² 

^{1,2} Samsun University, Biomedical Engineering Department, 55420, Samsun, Türkiye

Abstract

Large Language Models (LLMs) have gained popularity across healthcare and attracted the attention of researchers of various medical specialties. Determining which model performs well in which circumstances is essential for accurate results. This study aims to compare the accuracy of recently developed LLMs for medical imaging systems and to evaluate the reliability of LLMs in terms of correct responses. A total of 400 questions were divided into four categories: X-ray, ultrasound, magnetic resonance imaging, and nuclear medicine. LLMs' responses were evaluated with a zero-prompting approach by measuring the percentage of correct answers. McNemar tests were used to evaluate the significance of differences between models, and Cohen kappa statistics were used to determine the reliability of the models. Gemini Advanced, GPT-4, Copilot, and GPT-3.5 resulted in accuracy rates of 86.25%, 84.25%, 77.5%, and 59.75%, respectively. There was a strong correlation between Gemini Advanced and the GPT-4 compared with other models, $K=0.762$. This study is the first that analyzes the accuracy of responses of recently developed LLMs: Gemini Advanced, GPT-4, Copilot, and GPT-3.5 on questions related to medical imaging systems. And a comprehensive dataset with three question types was created within medical imaging systems, which was evenly distributed from various sources.

Keywords: Large language models, Medical imaging systems, Generative ai, Comparison of the accuracy, Foundation models

1 Introduction

A recent development in large language models (LLMs) has led to increased interest in LLMs that enable them to recognize, comprehend, analyze, and generate content. Through transformer-based architectures trained on a variety of text data, articles, websites, and books, the processes of

Öz

Büyük dil modelleri (LLM'ler) sağlık hizmetlerinde popülerlik kazanmış ve çeşitli tıbbi uzmanlık alanlarındaki araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Doğru sonuçlar için hangi modelin hangi koşullarda iyi performans gösterdiğini belirlemek önemlidir. Bu çalışma, yeni geliştirilen büyük dil modellerinin tıbbi görüntüleme sistemleri için doğruluklarını karşılaştırmayı ve bu modellerin verdikleri doğru yanıtlar açısından birbirleri arasındaki uyumluluklarını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu değerlendirme için toplam 400 soru X-ray, ultrason, manyetik rezonans görüntüleme ve nükleer tıp görüntüleme olarak dört kategoriye ayrılmıştır. Büyük dil modellerinin yanıtları, doğru yanıtların yüzdesi ölçülerek sıfır-atışlı yönlendirme yaklaşımıyla değerlendirilmiştir. Modeller arasındaki farkların anlamlılığını değerlendirmek için McNemar testi, modellerin güvenilirliğini belirlemek için ise Cohen kappa istatistiği kullanılmıştır. Gemini Advanced, GPT-4, Copilot ve GPT-3.5 için sırasıyla %86.25, %84.25, %77.5 ve %59.75 doğruluk oranları elde edilmiştir. Diğer modellerle karşılaştırıldığında Gemini Advanced ve GPT-4 arasında güçlü bir korelasyon bulunmuştur, $K=0.762$. Bu çalışma, yakın zamanda geliştirilen Gemini Advanced, GPT-4, Copilot ve GPT-3.5'in tıbbi görüntüleme sistemleriyle ilgili sorulara verdiği yanıtların doğruluğunu analiz eden ilk çalışmadır. Ayrıca bu çalışma ile tıbbi görüntüleme sistemleri ile ilgili çeşitli kaynaklardan üç soru tipinden oluşan kapsamlı bir veri seti oluşturulmuştur.

Anahtar kelimeler: Büyük dil modelleri, Tıbbi görüntüleme sistemleri, Üretken yapay zeka, Doğruluğun karşılaştırılması, Alt yapı modelleri

learning, understanding, and generating text can be achieved [1]. Several LLMs have been developed to obtain more desired responses. OpenAI released GPT-3.5 (ChatGPT) and GPT-4 (ChatGPT Plus) based on the Generative Pretrained Transformer (GPT) architecture in the last two years [2, 3]. Furthermore, Microsoft made a new investment in OpenAI and developed the Bing Chat model, which is similar to

ChatGPT and known as Copilot [4]. Similarly, in December 2023, Google DeepMind released a new multimodal model called Gemini to replace Bard [5]. Today, these models have gained more attraction and are preferred across multiple disciplines due to their higher potential on providing responses, insights, suggestions, and even designing proposals.

Higher-order thinking requires advanced cognitive processes such as creating, analyzing, evaluating, and criticizing. The human brain processes and transfers deep information, which results in these processes. Researchers are trying to use deep and reinforcement learning methods; and attempt to build a basis for high-level thinking in machines and software. Investigating LLMs is a continuing concern within comprehensive implications in various fields of medicine and biomedical literature [6], including studies on clinical decision support (CDS) in radiology [7], medical and/or pathology examinations [8-13], symptoms [14], for the interpretation of radiological images [15].

One example of LLMs in medicine is to compare the performances of the GPT-4, the GPT-3.5, and the Med-PaLM on medical exams and benchmark datasets [8]. Nori et al. [8] evaluated the results for the zero-shot and the five-shot responses on text- and visual media-related questions and found that the GPT-4 performed significantly better than the GPT-3.5 and the Med-PALM. In another study, GPT-4 has been used to assess 52 radiological images obtained from Computed Tomography (CT), X-Ray, and Ultrasound (US) [15]. Brin et al. [15], however, found that GPT-4 did not provide reliable results for the interpretation of radiological images despite its potential uses in non-medical images. Huh et al. [12] compared the ChatGPT with medical students on the pathology examination in Korea. They observed that the performance of the ChatGPT was lower than that of the medical students. There was a 60.8% accuracy rate in the ChatGPT compared to 90.8% in the medical students' accuracy rate. Wang et al. [13] compared the knowledge ability of the ChatGPT with medical students using the Chinese National Medical Licensing Examination (NMLE) which belongs to the years 2020 to 2022. They found that the ChatGPT's performance was lower than that of the medical students. Gilson et al. [9] evaluated the ChatGPT compared with GPT-3 and InstructGPT on multiple choice questions from the United States Medical Licensing Examination (USMLE). The ChatGPT outperforms the other two methods by an 8.15% improvement with a 64.4% accuracy rate. Kung et al. [10] compared the performance of the ChatGPT on two different question models, the multiple-choice question, and the open-ended question, obtained from the USMLE. The ChatGPT model succeeded in three exams without reinforcement for the 60% threshold level. In another study, Sinha et al. [11] evaluated the ChatGPT's performance on 100 reasoning-type questions classified as higher-order knowledge in pathology. They categorized answers into five different scales and the ChatGPT's accuracy was around 80%. Efficient prompting techniques have been needed to reach more desired and correct outputs. However, LLMs' accuracy performances are varying and affected by inter- and intra-user variability. Therefore, zero-shot prompting

analysis has been conducted in this study on recent large language models to avoid variability and subjectivity. The differences between the related works cited above and our study are summarized in Table 1. Knowing which model performs well in which situations and using it in education and research is essential to obtain accurate results. Although extensive research has been carried out on ChatGPT, no single study exists that compares the performance of the Gemini Advanced with other popular chatbots; GPT-4, Copilot, and GPT-3.5 on medical imaging systems in biomedical literature.

Our study contributes to the literature by addressing the following issues:

- 1) This study is the first that analyzes the accuracy of responses of recently developed LLMs such as Gemini Advanced, GPT-4, Copilot, and GPT-3.5 on questions related to medical imaging systems.
- 2) The performance of LLM models among various imaging modalities was also calculated for different question types. The compatibility of the LLM model was demonstrated for various question types in medical imaging systems.
- 3) A comprehensive dataset including three question types is created from various sources of medical imaging books.

2 Material and methods

2.1 Dataset

The dataset consists of four groups of questions and each group includes 100 questions covering medical imaging systems such as X-rays, US, MRIs, and nuclear medicine imaging systems. There are three subcategories of questions in each group: open-ended (OE), multiple-choice (MC), and computational questions (CQ). In each of these subgroups, the proportions of questions are arranged to have approximately equal weights using various sources of medical imaging systems [16-31]. The following are three different types of questions asked to LLMs. The Supplementary_file_dataset presents all questions with their references used in the study.

Open-ended questions are generally based on knowledge and interpretation.

Sample question: "What determines the highest energy of x-ray photons emitted from an x-ray tube?" The correct answer: "The highest energy is determined by the peak x-ray tube voltage. For example, if the peak voltage is p kV, then the peak x-ray energy will be p keV" [16].

Questions with at least two answer options are categorized as multiple-choice groups.

Table 1. Comparison of the state-of-the-art studies with our method

Related Works	LLMs	Tasks	Results	Comparisons with our studies
Şahin et al. (2024) [14]	ChatGPT, Ernie, Bard, Bing Copilot	To compare readability and quality of chatbots' responses	Bard is better than the other methods for readability	<ul style="list-style-type: none"> • Bard is replaced by a new model Gemini Advanced. • A relatively small number of questions were included in their study. • Our study is related to chatbots' accuracy on medical imaging. • Our study uses a new version GPT-4 and Gemini Advanced.
Brin et al. (2023) [15]	GPT-4	To assess radiological images	GPT-4 did not provide reliable results for the interpretation of radiological images.	<ul style="list-style-type: none"> • The study is related only radiological images. • A small number of images. • Lack of other LLMs: Gemini Advanced, Copilot, GPT-3.5
Huh et al. (2023) [12]	ChatGPT (the version cannot be defined)	To compare the ChatGPT and medical students on pathology examinations	The performance of the ChatGPT was lower than the medical students.	<ul style="list-style-type: none"> • A relatively small number of questions. • Lack of other LLMs: Gemini Advanced, Copilot, and GPT-4. • The study is related with the pathology exams.
Gilson et al. (2023) [9]	ChatGPT, GPT-3, InstructGPT	They compared 3 LLMs on USMLE	The ChatGPT outperforms the others.	<ul style="list-style-type: none"> • The previous version of ChatGPT is used. • A relatively small number of questions. • No various question types are tested. • Lack of other LLMs: Gemini Advanced, Copilot.
Kung et al. (2023) [10]	ChatGPT	To observe the performance of the ChatGPT on USMLE questions.	The ChatGPT model succeeded three exams without reinforcement.	<ul style="list-style-type: none"> • Lack of other LLMs: Gemini Advanced, Copilot, GPT-4. • Computational questions are not included.
Nori et al. (2023) [8]	GPT-4, GPT-3.5, Med-PALM	To compare the performance of the LLMs on medical challenge problems	the GPT-4 performed significantly better than the others.	<ul style="list-style-type: none"> • Lack of other LLMs: Gemini Advanced, Copilot. • The study is related to the medical challenge problems.
Wang et al. (2023) [13]	ChatGPT	To compare the knowledge ability of the ChatGPT with medical students using Chinese NMLE	The ChatGPT does not perform at the same level as students.	<ul style="list-style-type: none"> • Only the ChatGPT model is used. • Lack of other LLMs: Gemini Advanced, Copilot, GPT-4 • Variation of the question types is not considered.
Sinha et al. (2023) [11]	ChatGPT	To evaluate the performance of the ChatGPT on solving questions.	The ChatGPT's accuracy was around 80%.	<ul style="list-style-type: none"> • The study concerned only reasoning-type questions. • Lack of other LLMs: Gemini Advanced, Copilot. • Variation of the question types is not considered.
Rao et al. (2023) [7]	GPT-3.5 GPT-4	To evaluate GPT-3.5 and GPT-4 performance for clinical decision support (CDS) in radiology for breast cancer imaging and breast pain	ChatGPT-4 performed higher performances on radiology clinical decision-making tasks as compared with ChatGPT-3.5.	<ul style="list-style-type: none"> • The study only related to the breast cancer imaging devices and breast brain. • Lack of other LLMs: Gemini Advanced, Copilot. • Variation of the question types is not considered.
Our study	ChatGPT including GPT-3.5, GPT-4, Copilot, Gemini Advanced	To evaluate the performance of the various LLMs on various types of 400 questions related with medical imaging systems.	The accuracy rates of the LLMs were 86.25%, 84.25%, 77.5%, and 59.75% for the Gemini Advanced, the GPT-4, Copilot, and the GPT-3.5, respectively.	

Sample question: “Of the digital radiographic detectors currently available, which is based on the use of photostimulable phosphors for image production?
a. Computed radiography detectors
b. Indirect flat-panel detectors
c. Direct flat-panel detectors
d. Charge coupled device”
The correct answer: “Computed radiography detectors” [17].

In computational questions, simple equations and mathematical expressions such as “sin (x)” or “2x-5” are written directly as text. The LaTeX script was used for more complex mathematical expressions.

Sample question: “Show that the decay factor DF is related to the half-life by $DF = e^{\frac{0.693t}{T_{1/2}}}$.” The correct answer: $DF = e^{-\lambda t}, \frac{N(t)}{N(0)} = \frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{1/2}}, \ln 2 = \lambda t_{1/2}, \lambda = \frac{0.693}{t_{1/2}}, DF = e^{-\frac{0.693t}{t_{1/2}}}$ obtained from the reference [16].

2.2 Large Language Models

LLMs use enormous data for training and successively manage text to produce coherent and context-sensitive responses within a conversational framework. The accuracy of the answers in response to specific tasks is an essential factor that increases competition between the chatbots. The answer accuracy performance of the latest models (GPT-3.5, GPT-4, Copilot, and Gemini Advanced) was compared and as a means of avoiding subjectivity, the zero-shot performance of the models was measured. We input each question separately to the GPT-3.5, GPT-4, Copilot, and Gemini Advanced language models. All answers given were compared with the correct answers, which were recorded as 1 if correct or 0 if incorrect. In order to prevent errors in checking answers, both authors used the cross-checking method. While asking questions, to prevent response-by-response variation and cascading effects, each question was prompted three times with restarting the model, and highest number of identical responses were recorded as the answer of the model. A more creative conversation style was used for Copilot, whereas standard parameter settings were used for other models. Figure 1 presents an overview of the study protocol.

2.3 Performance measurement and statistical analysis

Each LLM's performance is evaluated by determining the percentage of correct answers given by the model to the total number of questions asked. Equation (1) defines the accuracy percentage (Acc%) of the model. The McNemar test was used to determine the significance of the difference between the groups, and the Cohen kappa (κ) statistic was used to assess their compatibility. All analyses were performed using SPSS version 23 [32].

$$Acc\% = \frac{\text{Number of correct answers}}{\text{Number of total questions in the group}} \times 100 \quad (1)$$

3 Results

A dataset consisting of 400 questions in total was produced, with three types of questions (OE, MC, and CQ) and four groups of 100 questions each (x-ray imaging, US, MRI, and nuclear medicine). Supplementary_file_results provides evaluations of all responses. Our first aim was to reveal the performance of chatbots on questions related to medical imaging systems. As seen in Table 2, the Gemini Advanced model showed the best performance in all groups, while GPT-3.5 showed the lowest performance. Gemini Advanced and GPT-4 performances are very close to each other.

Table 2. Comparison table for accuracies of LLMs.

	LLMs' Accuracies			
	GPT-3.5	GPT-4	Copilot	Gemini Advanced
X-RAY	62% (62/100)	82% (82/100)	80% (80/100)	84% (84/100)
US	59% (59/100)	87% (87/100)	77% (77/100)	89% (89/100)
MRI	60% (60/100)	82% (82/100)	76% (76/100)	83% (83/100)
NM	58% (58/100)	86% (86/100)	77% (77/100)	87% (87/100)
Total (Mean±SD)	59.75% ± 1.71% (239/400)	84.25% ± 2.63% (337/400)	77.5% ± 1.73% (310/400)	86.25% ± 2.75% (345/400)

US: Ultrasound, MRI: Magnetic resonance imaging, NM: Nuclear medicine.

Additionally, we measured the performance of LLMs on answering computational questions and compared them to other question types as shown in Table 3. The best accuracy performance is achieved in open-ended questions for all model types. However, the lowest performance was observed for computational questions. Specifically, GPT-3.5 and Copilot language models perform considerably worse than other methods on computational questions. As far as the accuracy of the Gemini Advanced language model and GPT-4 is concerned, both are superior to the others.

Table 3. LLMs accuracies for various question types in medical imaging systems

	LLMs' Accuracies			
	GPT-3.5	GPT-4	Copilot	Gemini Advanced
OE questions	76.26% (106/139)	92.81% (129/139)	87.77% (122/139)	94.96% (132/139)
MC questions	66.67% (88/132)	87.88% (116/132)	85.61% (113/132)	89.39% (118/132)
Computational questions	33.88% (45/129)	71.32% (92/129)	58.14% (75/129)	73.64% (95/129)
Total (Mean±SD)	59.75% ± 22.22% (239/400)	84.25% ± 11.26% (337/400)	77.5% ± 16.52% (310/400)	86.25% ± 11.06% (345/400)

OE: Open-ended, MC: Multiple-choice

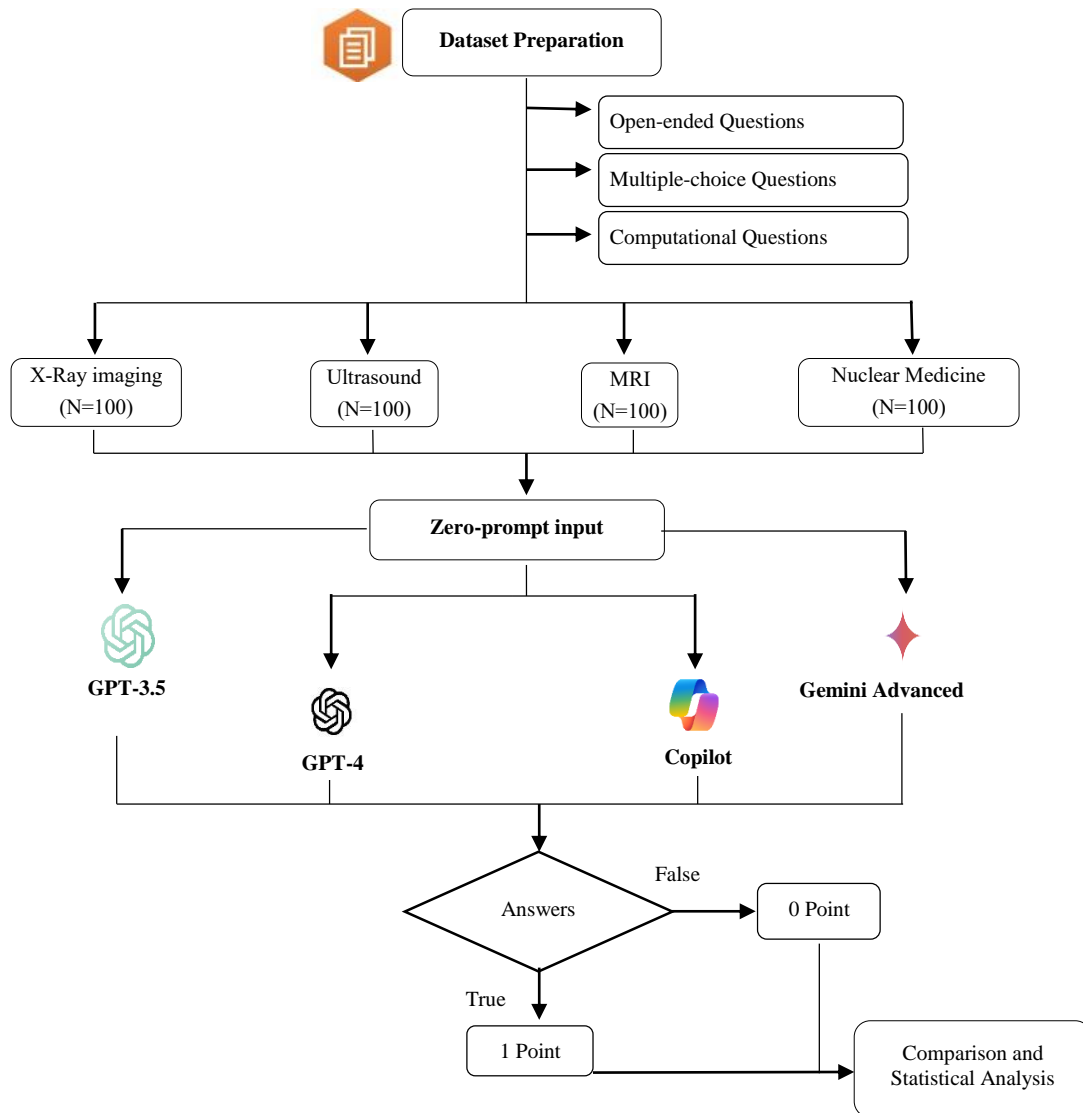


Figure 1. A schematic overview of the study protocol.

The significance level between the accuracy performances of the LLM models were analyzed in pairs using the McNemar test with a total data set of 400 questions. As shown in Table 4, statistically significant differences were observed for all groups ($p < 0.001$) except GPT-4 vs Gemini Advanced ($p = 0.152$). The highest difference, $\chi^2 = 104.009$ and $p < 0.001$, was obtained for the GPT-3.5 vs Gemini Advanced group. The lowest difference, $\chi^2 = 14.488$ and $p < 0.001$, was found for the GPT-4 vs Copilot group. The null hypothesis is rejected at a 5% significance level. According to the accuracy performances of the four models, Gemini Advanced, GPT-4, Copilot, and GPT-3.5 are arranged in decreasing order, but Gemini Advanced and GPT-4 have no statistically significant differences ($p = 0.152$).

Finally, we used Cohen's Kappa coefficient to determine how closely LLMs fit each other. A kappa value K changes from 0 to 1, and 0 indicates there is no correlation, 1 represents almost a perfect relationship between the two groups [33]. Table 4 presents kappa values for six dyads

based on four language models. The result showed that Gemini Advanced and GPT-4 are the most compatible and mainly produce correct answers to the same questions with similar accuracy ($K = 0.762$).

Table 4. Statistical analysis results for compared pair of groups.

	McNemar Test		Cohen's Kappa statistics (K)
	χ^2	p	
GPT-3.5 vs GPT-4	96.01	.000	.434
GPT-3.5 vs Copilot	69.014	.000	.602
GPT-3.5 vs Gemini Advanced	104.009	.000	.383
GPT-4 vs Copilot	14.488	.000	.671
GPT-4 vs Gemini Advanced	-	.152	.762
Copilot vs Gemini Advanced	26.884	.000	.642

4 Discussion

Gemini Advanced and GPT-4 are the highest-performing models in all medical imaging systems, as shown in Figure 2. Despite having similar accuracy rates, the Gemini Advanced has a higher accuracy percentage ranging from 83% to 90% as opposed to the GPT-4 model's 82% to 87%. Gemini Advanced, however, did not provide the correct answer to eight questions including five computational and three multiple-choice questions, whereas GPT-4 did, as shown in

Table 5. As a result of Gemini Advanced's performance, 16 questions were correctly answered, including eight computations, five multiple-choice, and three open-ended questions, while GPT-4's performance required assistance to get the right answers. It is difficult to determine the exact reason for this discrepancy due to differences in training data, model architecture, or other factors may have contributed to the difference in performance between the two versions.

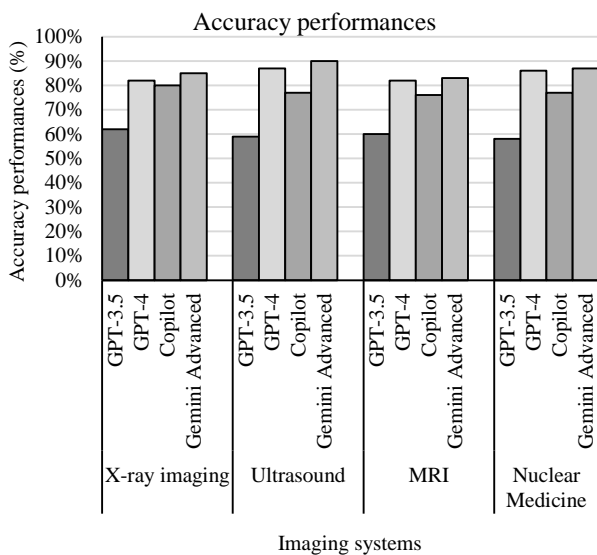


Figure 2. Comparison of accuracies of LLMs on various medical imaging fields

Previous studies cited in the introduction section have noted the importance of LLMs usage for educational, research, and teaching purposes in medicine and biomedical literature [7-15]. Our research included Google's newly developed model and other chatbots, and various question types were used as model inputs for medical imaging systems. The results showed that Gemini Advanced ranked first at 86.25%, followed by GPT-4 at 84.25%, Copilot at 77.50%, and GPT-3.5 at 59.75%. Moreover, according to Tables 2 and 3, the standard deviation of accuracy percentages varies from 1.71% to 2.75% for imaging modalities, and from 11.06% to 22.22% for question types. These results prove that question types significantly impact accuracy percentages, regardless of imaging modality types.

LLM models' compatibility with each other were evaluated and the result showed that the Gemini Advanced

and the GPT-4 were more compatible, $K = 0.762$. In contrast, the lowest compatibility was observed between the Gemini Advanced and the GPT-3.5, $K = 0.383$. The compatibility of Copilot with other models was also evaluated and the highest kappa value was observed between Copilot and GPT-4 for the binary groups with Copilot, $K = 0.671$. The fact that Copilot uses the GPT-4 model proves that the two models are highly compatible. Compared to the studies in the introduction section, our study also contributes to the literature by investigating the compatibility between Gemini Advanced and other different models in terms of correct responses to the questions.

Table 5. 2x2 contingency tables indicating performances of Gemini Advanced and GPT-4

	Total (N=400)		Computational questions (N=129)	
	GPT-4 correct answer	GPT-4 incorrect answer	GPT-4 correct answer	GPT-4 incorrect answer
Gemini Advanced correct answer	329	16	87	8
Gemini Advanced incorrect answer	8	47	5	29
	Open-ended questions (N=139)		Multiple-choice questions (N=132)	
	GPT-4 correct answer	GPT-4 incorrect answer	GPT-4 correct answer	GPT-4 incorrect answer
Gemini Advanced correct answer	129	3	113	5
Gemini Advanced incorrect answer	0	7	3	11

Contrary to these advancements, we observed that Copilot and Gemini Advanced had longer response times than ChatGPT models. The ability to respond to questions quickly is an essential consideration for users. Due to its earlier release, GPT-3.5 is also free and has more users than other models. For students and researchers to make an informed decision regarding which model to use, they must be aware of LLMs' performance to determine and use the correct model based on the relevant tasks.

Our study has some limitations. We only used the zero-shot prompting technique to avoid subjectivity. The LLMs were not trained with any prompt inputs, and all models were restarted before each question. Another limitation is that the questions are only provided to the models as text input. Radiological images play an essential role in medical imaging systems, in addition to text questions. Brin et al. conducted a study on the interpretation of radiological images using GPT-4 and stated that GPT-4 did not give satisfactory results [15]. We therefore excluded radiological images and image-based questions from our study.

5 Conclusion

A recent development in LLMs has led to increased interest in foundation models that enable them to recognize, comprehend, analyze, and generate content. Determining which model performs well in which circumstances is important for better productivity. We determine the accuracy performance of LLM models on various questions related to medical imaging systems and investigate the reliability of the LLM models in their accurate response to questions for a specified task. The results showed that the Gemini Advanced model performed superior in all groups, while GPT-3.5 showed the lowest performance. Gemini Advanced and GPT-4 accuracy performances are very close to each other.

Additionally, the performance of LLMs for various types of questions was also evaluated. The best accuracy performance was observed in open-ended questions for all model types. However, the lowest performance was observed with computational questions. We also evaluated LLM models' compatibility with each other and found that the Gemini Advanced and the GPT-4 were more compatible. In the future, a comparative experiment will be conducted on humans using the dataset of this study.

Conflict of interest

Authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 11%

References

- [1] S. R. Bowman, Eight things to know about large language models, arXiv preprint arXiv:2304.00612, 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.01964>
- [2] ChatGPT. <https://chat.openai.com/> Accessed 27 Feb. 2024.
- [3] GPT-4. <https://openai.com/research/gpt-4>, Accessed 27 Feb. 2024.
- [4] Bing Chat: how to use Microsoft's own version of ChatGPT Digital Trends. <https://www.digitaltrends.com/computing/how-to-use-microsoft-chatgpt-bing-edge/>, Accessed 27 Feb. 2024.
- [5] Gemini - Google DeepMind. <https://deepmind.google/technologies/gemini/#gemini-1.0>, Accessed 28 Feb. 2024.
- [6] A. J. Thirunavukarasu, D. S. J. Ting, K. Elangovan, L. Gutierrez, T. F. Tan, and D. S. W. Ting, Large language models in medicine, *Nature medicine*, vol. 29, no. 8, pp. 1930–1940, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02448-8>
- [7] A. Rao, J. Kim, M. Kamineni, M. Pang, W. Lie, K. J. Dreyer, M. D. Succi, Evaluating GPT as an adjunct for radiologic decision making: GPT-4 versus GPT-3.5 in a breast imaging pilot, *Journal of the American College of Radiology*, vol. 20, no. 10, pp. 990–997, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jacr.2023.05.003>
- [8] H. Nori, N. King, S. M. McKinney, D. Carignan, and E. Horvitz, Capabilities of gpt-4 on medical challenge problems, arXiv preprint arXiv:2303.13375, 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.13375>
- [9] A. Gilson, C. W. Safranek, T. Huang, V. Socrates, L. Chi, R. A. Taylor, D. Chartash, How does ChatGPT perform on the United States Medical Licensing Examination (USMLE)? The Implications of Large Language Models for Medical Education and Knowledge Assessment, *JMIR Medical Education*, vol. 9, no. 1, p. e45312, 2023. [doi:10.2196/45312](https://doi.org/10.2196/45312)
- [10] T. H. Kung, M. Cheatham, A. Medenilla, C. Sillos, L. Leon, C. Elepaño, M. Madriaga, R. Aggabao, G. Diaz-Candido, J. Maningo, V. Tseng, Performance of ChatGPT on USMLE: potential for AI-assisted medical education using large language models, *PLoS digital health*, vol. 2, no. 2, p. e0000198, 2023. <https://doi.org/10.1371/journal.pdig.0000198>
- [11] R. K. Sinha, A. D. Roy, N. Kumar, H. Mondal, and R. Sinha, Applicability of ChatGPT in assisting to solve higher order problems in pathology, *Cureus*, vol. 15, no. 2, 2023. [doi: 10.7759/cureus.35237](https://doi.org/10.7759/cureus.35237)
- [12] S. Huh, Are ChatGPT's knowledge and interpretation ability comparable to those of medical students in Korea for taking a parasitology examination?: A descriptive study," *Journal of educational evaluation for health professions*, vol. 20, 2023. <https://doi.org/10.3352/jeehp.2023.20.1>
- [13] X. Wang, Z. Gong, G. Wang, J. Jia, Y. Xu, J. Zhao, Q. Fan, S. Wu, W. Hu, X. Li, ChatGPT performs on the Chinese national medical licensing examination, *Journal of Medical Systems*, vol. 47, no. 1, p. 86, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10916-023-01961-0>
- [14] M. F. Şahin, H. Ateş, A. Keleş, Ç. Doğan, M. Akgül, C. M. Yazıcı, R. Özcan, Responses of five different artificial intelligence chatbots to the top searched queries about erectile dysfunction: A comparative analysis, *Journal of Medical Systems*, vol. 48, no. 1, p. 38, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10916-024-02056-0>
- [15] D. Brin, V. Sorin, Y. Barash, E. Konen, B. S. Glicksberg, G. N. Nadkarni, E. Klang, Assessing GPT-4 multimodal performance in radiological image analysis, *medRxiv*, pp. 2023–11, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00330-024-11035-5>
- [16] J. L. Prince and J. M. Links, *Medical imaging signals and systems*, vol. 37. Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, 2006.
- [17] E. Seeram, *Medical Imaging Informatics, Digital Radiography: Review Questions*, pp. 85–95, 2021.
- [18] K. H. Ng, J. H. D. Wong, and G. Clarke, *Problems and solutions in medical physics: Diagnostic Imaging Physics*. CRC Press, 2018.
- [19] W. R. Hendee and E. R. Ritenour, *Medical imaging physics*. John Wiley & Sons, 2003.
- [20] G. Sawhney, *Fundamental of biomedical engineering*. New Age International, 2007.
- [21] A. P. Dhawan, *Medical image analysis*. John Wiley & Sons, 2011.
- [22] B. H. Brown, R. H. Smallwood, D. C. Barber, P. Lawford, and D. Hose, *Medical physics and biomedical engineering*. CRC Press, 2017.
- [23] J. A. Miller, *Review Questions for Ultrasound: A Sonographer's Exam Guide*. Routledge, 2018.
- [24] C. K. Roth and W. H. Faulkner Jr, *Review questions for MRI*, 2013.

- [25] S. C. Bushong and G. Clarke, Magnetic resonance imaging: physical and biological principles. Elsevier Health Sciences, 2003.
- [26] H. Azhari, J. A. Kennedy, N. Weiss, and L. Volokh, From Signals to Image. Springer, 2020.
- [27] W. A. Worthoff, H. G. Krojanski, and D. Suter, Medical physics: exercises and examples. Walter de Gruyter, 2013.
- [28] M. Chappell, Principles of Medical Imaging for Engineers. Springer, 2019.
- [29] E. Mantel, J. S. Reddin, G. Cheng, and A. Alavi, Nuclear Medicine Technology: Review Questions for the Board Examinations. Cham: Springer International Publishing, 2023. <https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-26720-8>, Accessed 20 Mar. 2024.
- [30] K. H. Ng, C. H. Yeong, and A. C. Perkins, Problems and Solutions in Medical Physics: Nuclear Medicine Physics, 1st ed. CRC Press, 2019. <https://www.taylorfrancis.com/books/9780429629129>, Accessed 20 Mar. 2024.
- [31] D. D. Feng, Biomedical information technology. Academic Press, 2011.
- [32] IBM SPSS Statistics for Windows. IBM Corp., Armonk, NY, Released 2015.
- [33] M. L. McHugh, Interrater reliability: the kappa statistic, Biochemia medica, vol. 22, no. 3, pp. 276–282, 2012.





Phase shifter intelligent reflective surface design for 2.4 GHz 2.4 GHz için faz kaydırıcı akıllı yansıtıcı yüzey tasarımı

Yasin Can Tekkol^{1,*}, Ayşe Elif Canbilen²

¹ Konya Technical University, Graduate Education Institute, 42250, Konya Türkiye

² Konya Technical University, Electrical-Electronics Engineering Department, 42250, Konya Türkiye

Abstract

In this study, an intelligent reflective surface (IRS) design consisting of a 3x4 patch surface that intentionally changes the phase angles of incoming signals for the 2.4 GHz operating frequency is presented. In the design of this IRS, FR-4 is chosen as the dielectric material, and copper is used to create both the reflecting elements and the ground plane. Phase shifting characteristic is achieved by using varactor diodes on the designed two-dimensional surface. In order to test the behaviour of the IRS, a horn antenna is also designed to be used as a source with the ANSYS HFSS (v21) program. The obtained results are presented in terms of return loss and gain values of the IRS. The results of the simulations reveal that the phase angles of the incoming signals can be adjusted as expected by changing the capacity values of the varactor diodes modelled by their equivalent circuits on the IRS.

Keywords: Intelligent reflective surface (IRS), varactor diode, phase shifter, HFSS.

1 Introduction

In recent years, it has become difficult to achieve spectrum efficiency in wireless communications with the use of ultra-dense networks (UDN). In addition, it is known that network energy consumption and hardware costs are important problems that need to be taken into account in practical applications of massive multiple-input multiple-output (M-MIMO) systems and millimeter wave (mmWave) communications [1]. These systems require costly radio frequency (RF) chains and complex signal-processing techniques for efficient communication. On the other hand, adding too many active components, such as small cell base stations and relays, to wireless networks causes a more serious interference problem. Therefore, it is necessary to research to find both spectral and energy-efficient techniques with low hardware costs and to realize sustainable fifth generation (5G) wireless networks and beyond [2]. In order to achieve these challenging goals, intelligent reflective surface (IRS) technology is proposed as a promising, environmentally friendly, and cost-effective solution [3].

Passive reflective surfaces, which are the basis of the IRSs, have so far been used in various applications such as radar systems, remote sensing, and satellite relaying, but have rarely been used in wireless mobile communications. This is mainly because traditional reflective surfaces only

Öz

Bu çalışmada 2.4 GHz çalışma frekansı için 3x4 yama yüzeyinden oluşan gelen sinyallerin faz açılarını değiştiren akıllı yansıtıcı yüzey (IRS) tasarımı sunulmuştur. IRS tasarımında dielektrik malzeme olarak FR-4, yansıtıcı yüzeylerde ve toprak düzlemde bakır malzeme seçilmiştir. IRS tasarımında varaktör diyot kullanılarak tasarıma faz kaydırıcı özellik kazandırılmıştır. IRS tasarımını ve tasarımın faz kaydırıcı özelliğini test etmek için gerekli kaynak boynuz anten ve varaktör diyotlar ANSYS'in HFSS (v21) programı ile tasarlanmış ve simüle edilmiştir. Simülasyon sonucunda IRS'e gelen sinyallerin IRS üzerinde bulunan varaktör diyot eşdeğer devrelerinin kapasite değerleri değiştirilerek faz açılarının değiştirilebildiği ortaya konulmuş ve tasarıma ait geri dönüş kayıpları ve kazanç değeri verilmiştir.

Anahtar kelimeler: IRS, Varaktör diyot, Faz kaydırma, HFSS.

have fixed phase shifters that cannot address dynamic wireless channels caused by the users' mobility. However, recent advances in micro-electro-mechanical systems (MEMS) and meta-materials have made it possible to reconfigure reflective surfaces by controlling phase shifters in real time dynamically, thus enabling their use in wireless mobile communications [4].

IRS, as a two-dimensional structure with a large number of passive reflector elements, is envisioned as one of the revolutionary technologies to provide both energy-efficient and intelligent wireless communications [5]. In fact, they basically consist of: *i*) a substrate made of dielectric material, *ii*) conductive ground and reflective microstrip patch layers, *iii*) semiconductor elements such as PIN or varactor diodes to process incoming signals, and *iv*) a microcontroller that controls these semiconductor elements [6]. The use of RISs in different scenarios has been discussed in the literature, such as data transfer between objects in IoT networks, positioning purposes, transferring signals to blind spots where signals cannot reach, sending jamming signals to unauthorized listeners other than the receiver in systems where secure communication is prioritized, etc. [7-12].

For instance, it was stated in [13] that highly efficient spectrum sharing can be achieved with the IRS to solve the problem of heavy data traffic on wireless networks in indoor

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: yctekkol@gmail.com (Y. C. Tekkol)

Geliş / Received: 19.01.2024 Kabul / Accepted: 01.08.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1422104

environments such as conference halls and shopping malls. It was also shown that reducing the density in the RF spectrum is possible by shifting the phases of the incoming signals without making any hardware or software changes in the transmitters and/or receivers.

In another study [14], it was aimed to create a wireless network powered by a self-sustainable IRS with energy harvesting ability, similar to RF-powered backscatter-assisted relay communication. In this network, the IRS initially operates in energy harvesting mode to charge the capacitors within a specific time interval. Once the capacitors are charged, it works in reflection mode by adjusting phase shifts to assist in signal transfer from the access point to the receiver. In this way, a self-sufficient and environmentally friendly IRS that does not consume energy was presented.

Considering the above-mentioned points, an IRS is designed for this work and is intended to be used in environments where data traffic is dense in the target frequency band. The aim is to create a strong line-of-sight (LOS) path between the transmitter and the receiver by simply shifting the phase angles of the signals coming from the transmitter, thus steering the signals without any hardware modifications. Noting that the mid-band spectrum between 1 GHz and 6 GHz is considered perfect for 5G communications since it can carry a lot of data while traveling significant distances, the contributions of this study can be summarized as follows:

i) A design environment is created using the ANSYS HFSS (v21) program and a phase shifter IRS is designed for the operating frequency of 2.4 GHz. In this environment, a horn antenna operating in the same frequency band as the transmitting antenna is also designed.

ii) The phase angles of the signals coming from the horn antenna are consciously manipulated by using varactor diodes, which are assumed to be controlled by a microcontroller on the IRS.

iii) The reflection phase angles of the IRS are calculated at 2.4 GHz according to the capacity values of the varactor diodes in the 0-5 Volt range. The obtained results show that the reflection phases of the designed IRS can be arranged between -177.68° to 42.45° .

iv) The return loss and the gain of the IRS are also provided to provide more insights about the proposed design.

The details of the design and the obtained simulation results are presented in the following sections.

2 Materials and methods

This section is divided into three subsections. In the first one, the design parameters of the IRS are presented. In the second section, the features and design parameters of the source horn antenna that feeds the IRS are given. In the last section, the simulation environment is defined.

2.1 Phase shifter IRS design

In the IRS design to operate at 2.4 GHz, copper was chosen for the reflecting patches and ground plane, while FR4 material with a dielectric constant of $\epsilon_r= 4.4$ and thickness of $h_a= 1.6$ mm was chosen for the dielectric substrate. The proposed IRS design is given in Figure 1, in

which the orange regions show copper microstrip patches and the green regions represent FR4 substrate. As shown in this figure, the RIS consists of a total of 12 reflective patches arranged in a 3x4 pattern. The sizes of the substrate used in the design is given with $W_a = 250$ mm width and $L_a = 187.5$ mm length. The copper ground plane on the back side of the reflecting surface is also the same size as the substrate material.

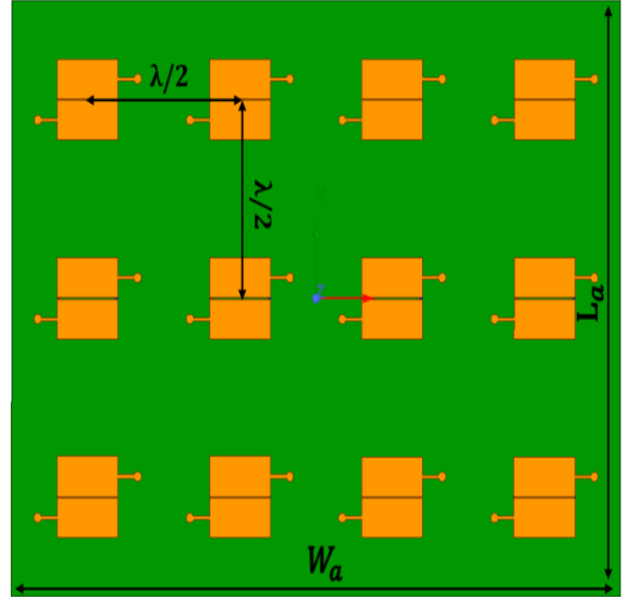


Figure 1. The proposed IRS design

The reflective patch design realized in the HFSS program is shown in detail in Figure 2. Here, the varactor diodes located between two rectangular patches and connecting them, are represented by red and blue colors. The width and length of the patch are denoted by W_y and L_y , respectively. Additionally, the length of the space between the two patches is represented by d , while the width and length of the connection points to be used to feed the varactor diodes are shown by W_1 and L_1 , respectively. The diameter of the circular region in Figure 2 is indicated as R . All these design parameters of the proposed IRS are given in Table 1.

Table 1. IRS design parameters

Reflective Surface Design Parameters	Symbol	Dimensions (mm)
Patch width	w_y	25
Patch length	L_y	25.5
Substrate width	w_a	250
Substrate length	L_a	187.5
Substrate thickness	h_a	1.6
The gap between the patches	d	0.5
Supply line length of varactor diode	L_1	6.14
Supply line width of varactor diode	w_1	1
Distance between the patches	λ_1	62.5
The diameter of the circular port	R	4

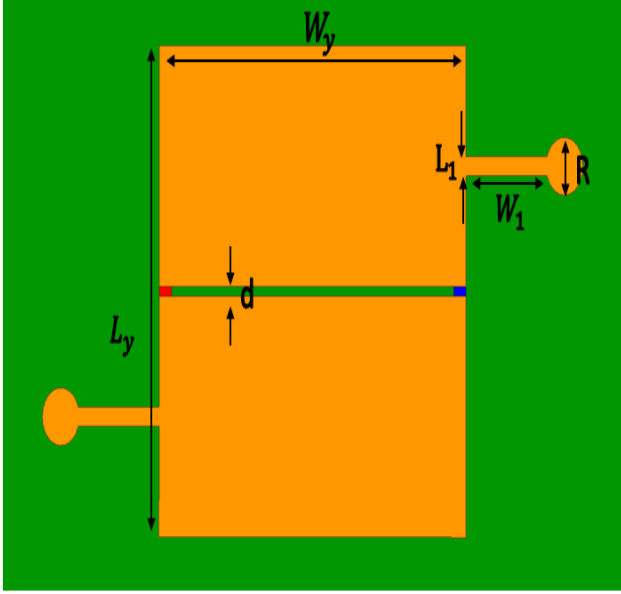


Figure 2. Detailed view of reflective surfaces

The distance between patches in reflecting arrays is directly related to the wavelength, represented by λ , depending on the operating frequency. Here, λ is given by

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

in which c and f indicate the speed of light in vacuum, and the operating frequency, respectively. Using Equation (1) by considering the target operating frequency of 2.4 GHz, the distance between consecutive patches in the proposed design is set to $\lambda/2 = 62.5$ mm, as usual in the literature [15]. It is worth noting that a minimum distance of $\lambda/2$ between the elements ensures that the signals received from the antenna elements are almost independent of each other in rich scattering environments. Besides, keeping the distance around $\lambda/2$ helps to minimize unwanted sidelobes, and aliasing, thus improving the overall directivity.

To change the phase angle of the incoming signals, a total of 24 varactor diodes were used, assuming there were 2 in each reflector. Skyworks SMV1249-079LF model varactor diode with SC-79 case is modeled in HFSS by using its equivalent circuit given in data sheets. In order to control the capacity values of these varactor diodes, each diode pair is fed with a pulse-width modulation (PWM) signal produced in the range of 0-5 Volts. By changing the amplitude of the PWM signal, the capacity values of the varactor diodes are adjusted, and the phase angles of the incoming signals are manipulated. The capacitance values corresponding to the voltage values varying between 0-5 Volts with 0.5 Volt precision are given in Table 2 and visualized in Figure 3 based on the datasheet of the varactor diode model used in the proposed design [16].

2.2 Source antenna design

In this section, a horn antenna operating at 2.4 GHz frequency designed in HFSS program is presented as the source antenna to enable a simulation environment to examine the reflective feature of the proposed IRS.

The designed horn antenna mainly consists of two structures: a pyramidal horn part and a radiation box as shown in Figure 4. As can be seen here, the width, length, and height of the horn part are denoted by W_{h1} , W_{h2} and L_{h1} , respectively. Additionally, the width, length and height of the radiation box are indicated by W_{I1} , W_{I2} and L_{I1} , respectively. The red part at the bottom of the radiation box represents the wave port. The details on the parameters of the horn antenna design are given in Table 3.

Table 2. Capacity value of the varactor diode according to the applied reverse voltage

Reverse voltage value (V)	Capacity value (pF)
0	37.35
0.5	25.88
1	18.18
1.5	12.08
2	7.27
2.5	4.44
3	3.40
3.5	2.96
4	2.72
4.5	2.51
5	2.38

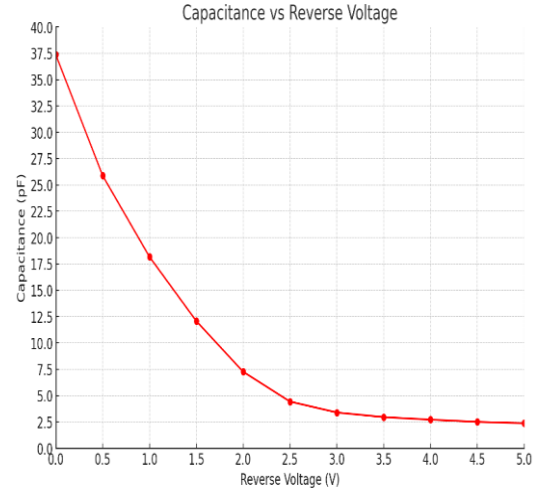


Figure 3. Capacitance vs Reverse Voltage

Table 3. Parameters of horn antenna

Horn antenna design parameters	Symbol	Dimensions (mm)
Horn width	w_{h1}	272
Horn length	w_{h2}	182
Horn height	L_{h1}	184.49
Radiation box width	W_{I1}	46
Radiation box length	W_{I2}	92
Radiation box height	L_{I1}	98

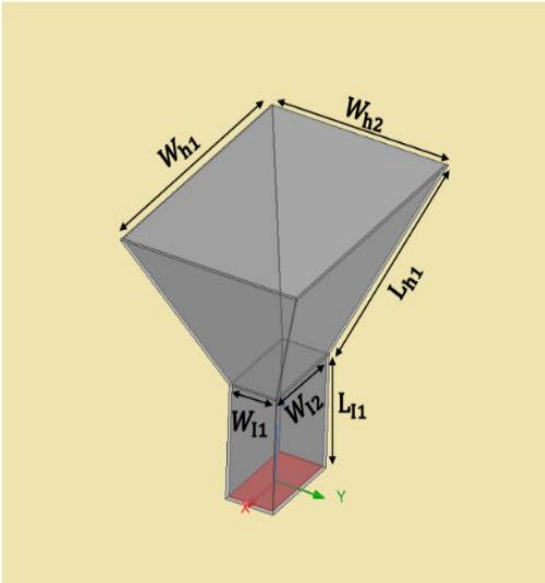


Figure 4. Horn antenna design

The return loss of the designed horn antenna is calculated, and a three-dimensional (3D) antenna gain graph is drawn through the simulations. The obtained results are provided in Figures 5 and 6. It can be seen in these figures that the return loss of the horn antenna is obtained as -36.2 dB and a gain of 14.2 dB is achieved at 2.4 GHz frequency. The standing wave ratio at 2.4 GHz frequency is also calculated via the simulations as 1.03. Hence, obviously, a producible high-gain directional source antenna is acquired as desired.

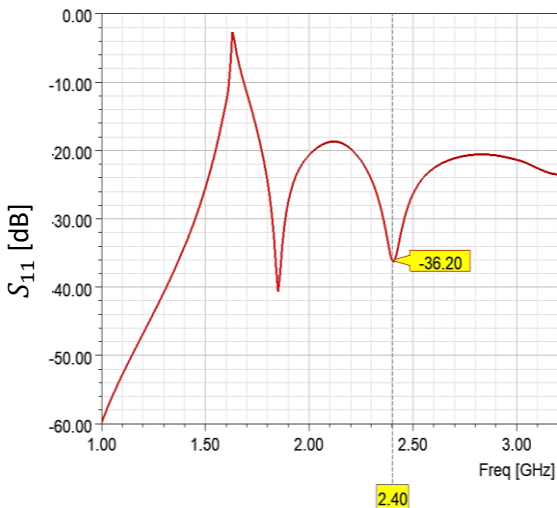


Figure 5. Return loss of the horn antenna

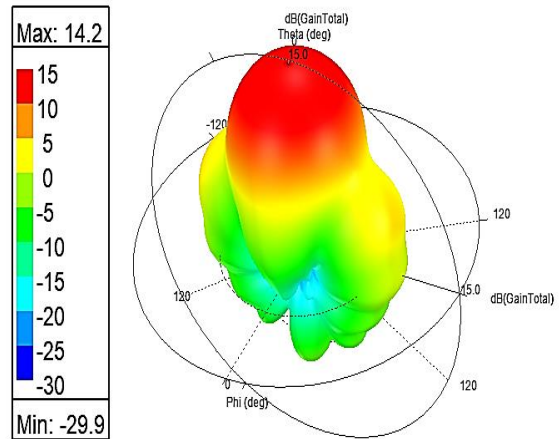


Figure 6. 3D gain graph of the designed horn antenna

2.3 Simulation design

In order to define the phase-shifting characteristics of the IRS, a simulation environment is generated in HFSS program consisting of the designed reflecting surface and the horn antenna as shown in Figure 7. As can be seen here, the horn antenna utilized as the source is assumed to be located 50 cm away from the reflecting surface with a 45° degree inclination.

All varactor diodes on the IRS are modeled by using the equivalent circuit of the chosen diode model given in Figure 8 to reflect varactor diode characteristics to the simulation environment and provide the same capacity value for each. The adjusted capacitance values in response to the reverse voltage to be applied between 0-5 Volts with a sensitivity of 0.5 Volts during the simulations are given in Table 2.

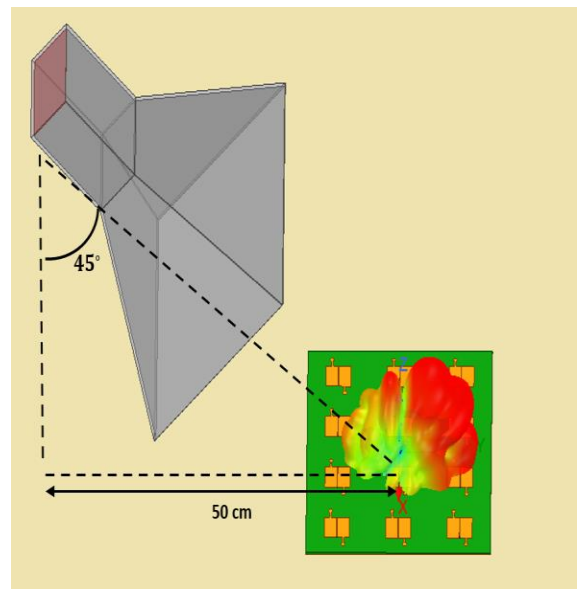


Figure 7. Simulation design

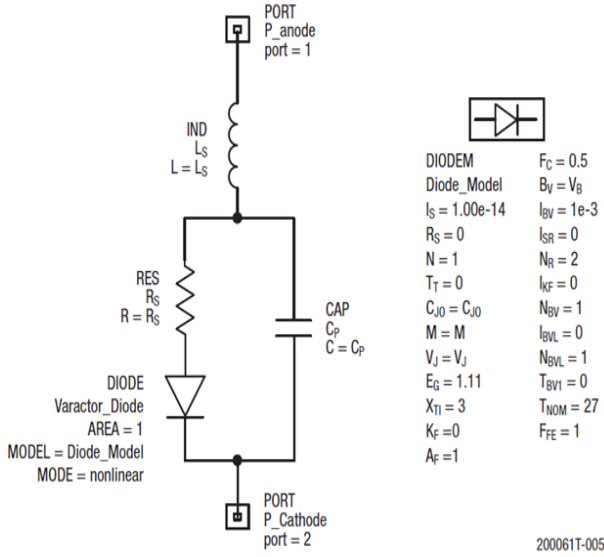


Figure 8. Equivalent circuit of the utilized varactor diode model

3 Results and discussions

In this section, various simulations are realized on the proposed IRS design, and the obtained results generated from the simulation environment given in Figure 7 are presented.

Firstly, the gain of the IRS is calculated for 2.4 GHz and a varactor diode capacitance value of 7.27 pF. The obtained 3D radiation pattern is introduced in Figure 9. Clearly, 11.6 dB gain at maximum is calculated for the IRS. Maximum gain values for other capacitance values of the varactor diode are also calculated to be an average of 11.6 dB.

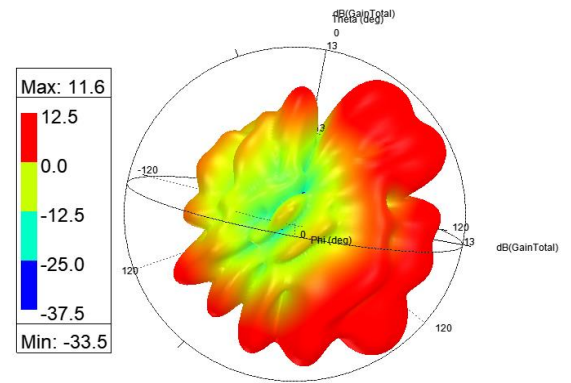


Figure 9. 3D gain graph of reflective surface

Next, the return loss of the IRS is calculated for varying capacitance values of the varactor diodes on the IRS design. The obtained return loss values for the frequency values between 1 to 3 GHz are given in Figure 10. Each of the eleven curves presented here specifies the values for predetermined capacity values given in Table 2, while the return losses corresponding to these values are shown in detail in Table 4. As seen from both Figure 10 and Table 4, the lowest return loss for 2.4 GHz is obtained as -55.90 dB with a capacity value of 2.38 pF when the varactor diode is fed with 5 Volts.

Lastly, the reflection phase angles of the IRS are calculated at 2.4 GHz according to the capacity values of the varactor diodes in the 0-5 Volt range, and the obtained results are included in Table 4. It is observed that the phase angles of the reflected signal change according to the capacity values of the varactor diode, and thus, the phase shifting characteristic is achieved for the IRS designed in this study. Figure 11 is also given to both visualize and extend this observation for the frequency values between 1.2 – 3 GHz

Table 4. Phase angles formed according to the capacity values of the varactor diode

Reverse voltage value (V)	Capacity values of varactor diodes (pF)	Return loss (dB)	Phase Angles (degree)
0	37.35	-38.40	-170.10
0.5	25.88	-39.21	-151.48
1	18.18	-39.39	-161.35
1.5	12.08	-30.45	-177.68
2	7.27	-45.72	42.45
2.5	4.44	-31.75	-99.41
3	3.40	-40.95	-63.36
3.5	2.96	-40.48	-68.80
4	2.72	-48.57	-71.03
4.5	2.51	-42.61	-71.33
5	2.38	-55.90	-146.63

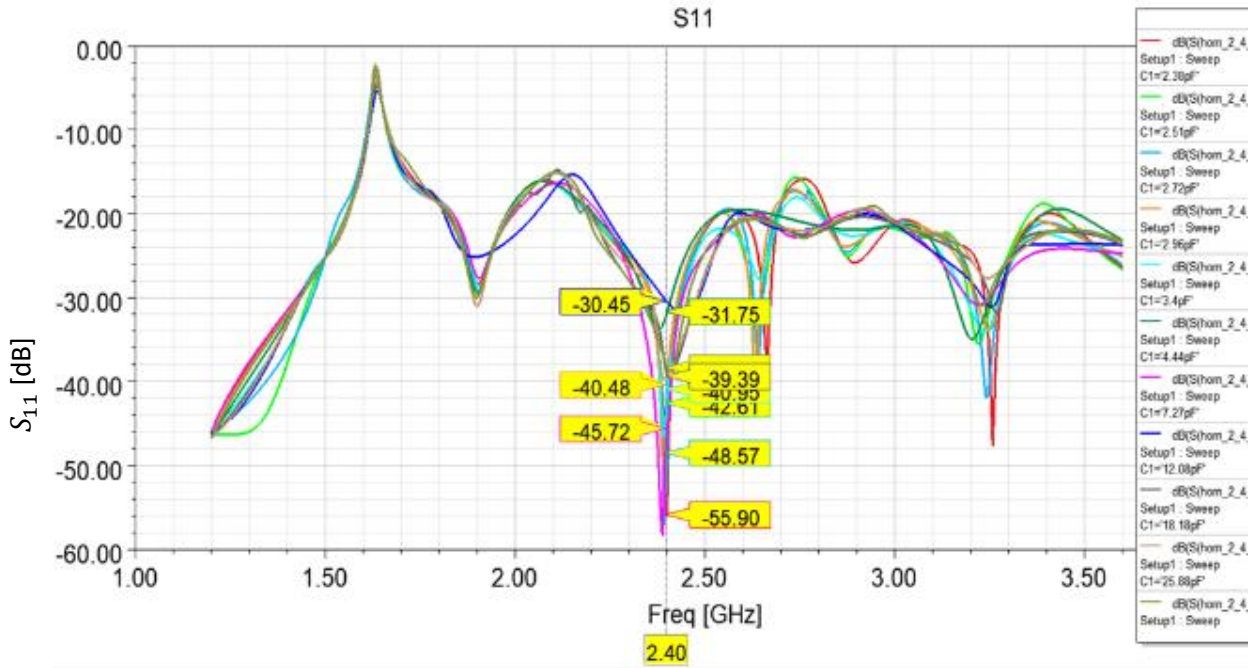


Figure 10. Return loss for different capacitance values.

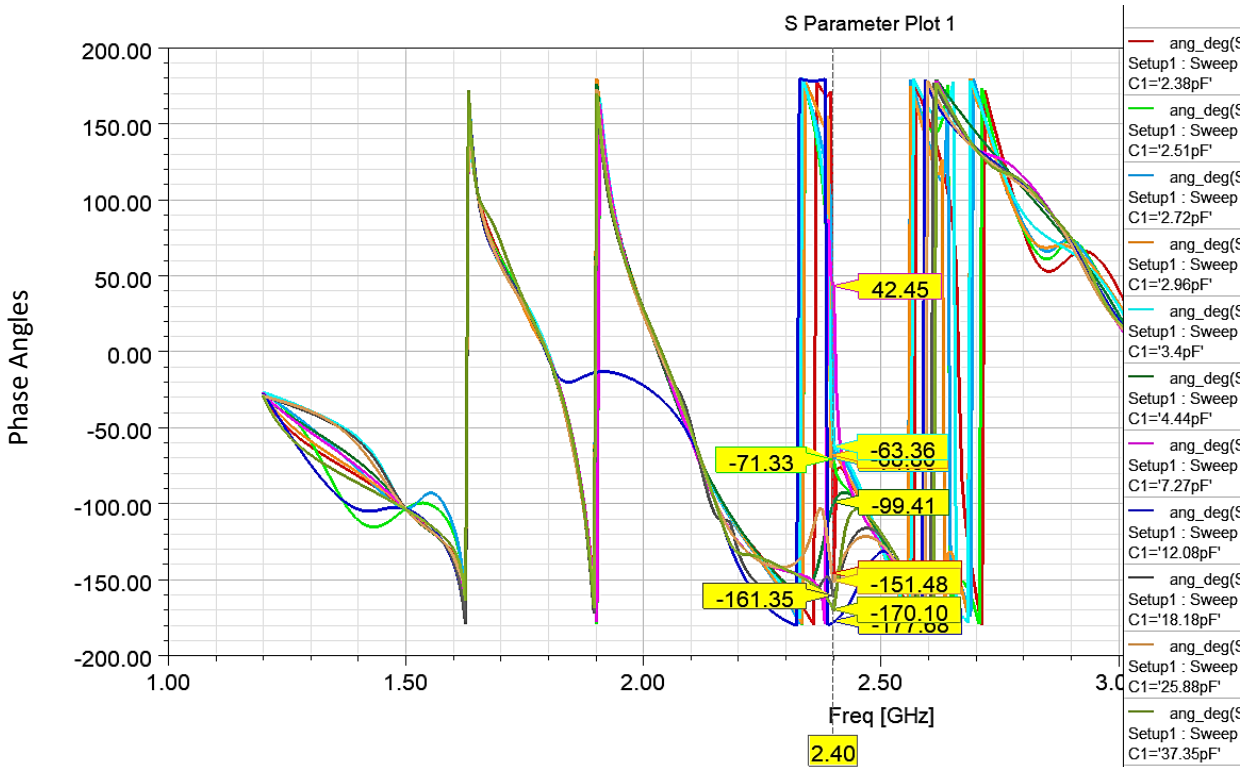


Figure 11. Phase angles according to the frequency values

4 Conclusions

In this study, an IRS design that operates in the mid-band of the 5G spectrum is designed for wireless communication networks with heavy data traffic. Specifically, it operates in the 2.4 GHz frequency band and can change the phase angles of the incoming signals according to the reverse voltage values to be applied between 0-5 Volts simulated by the capacity values of its varactor diodes. In practice, these voltage values can be provided as varying PWM signals. In other words, it has been demonstrated that by changing the capacity values of the varactor diodes on the IRS, the phase angles of the signals coming from the source antenna in the 2.4 GHz frequency band can be changed for a fixed operating frequency. In this way, it is expected that the provided design will be a solution to problems such as transferring the signal to blind spots and reducing data traffic. Considering that this is a preliminary study, it should be noted that the proposed IRS needs further improvements and specifications in the future.

Acknowledgment

This study was supported by Konya Technical University Scientific Research Projects (BAP) Coordination Office within the scope of thesis project no. 221002029.

Conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

Similarity rate (Turnitin) : %13

References

- [1] S. Zhang, Q. Wu, S. Xu and G. Y. Li, Fundamental green tradeoffs: Progresses, challenges, and impacts on 5G networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19 (1), 33-56 2016. <https://www.doi.org/10.1109/COMST.2016.2594120>
- [2] Q. Wu, G. Y. Li, W. Chen, D. W. K. Ng and R. Schober, An overview of sustainable green 5G networks. *IEEE Wireless Communications*, 24 (4), 72-80, 2017. <https://www.doi.org/10.1109/MWC.2017.1600343>
- [3] Q. Wu, and R. Zhang, Intelligent reflecting surface enhanced wireless network. Joint active and passive beamforming design. *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1-6, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2018.
- [4] Q. Wu, and R. Zhang, Towards smart and reconfigurable environment, Intelligent reflecting surface aided wireless network. *IEEE Communications Magazine*, 58 (1), 106-112, 2019. <https://www.doi.org/10.1109/MCOM.001.1900107>
- [5] L. Dai, B. Wang, M. Wang, X. Yang, J. Tan, S. Bi, S. Xu, F. Yang, Z. Chen, M. D. Renzo, C-B. Chae and L. Hanzo, Reconfigurable intelligent surface-based wireless communications, Antenna design, prototyping, and experimental results. *IEEE Access*, 8, 45913-45923, 2020. <https://www.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2977772>
- [6] W. Tang, X. Li, J. Y. Dai, S. Jin, Y. Zeng, Q. Cheng and T. J. Cui, Wireless communications with programmable metasurface: Transceiver design and experimental results. *China Communications*, 16 (5), 46-61 2019. <https://www.doi.org/10.23919/j.cc.2019.05.004>
- [7] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari and M. Ayyash, Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17 (4) 2347-2376 2015. <https://www.doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>
- [8] M. Chen, U. Challita, W. Saad, C. Yin and M. Debbah, Artificial neural networks-based machine learning for wireless networks: A tutorial. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21 (4) 3039-3071 2019. <https://www.doi.org/10.1109/COMST.2019.2926625>
- [9] M. N. Ahangar, Q. Z. Ahmed, F. A. Khan, and M. Hafeez, A survey of autonomous vehicles: Enabling communication technologies and challenges. *Sensors*, 21 (3), 706, 2021. <https://doi.org/10.3390/s21030706>
- [10] S. M. R. Islam, D. Kwak, M. H. Kabir, M. Hossain and K. S. Kwak, The internet of things for health care: a comprehensive survey. *IEEE Access* 3, 678-708, 2015. <https://www.doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2437951>
- [11] A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista and M. Zorzi, Internet of things for smart cities. *IEEE Internet of Things Journal*, 1 (1), 22-32, 2014. <https://www.doi.org/10.1109/JIOT.2014.2306328>
- [12] Q. Z. Ahmed, M. Hafeez, F. A. Khan and P. Lazaridis, Towards beyond 5G future wireless networks with focus towards indoor localization. In: 2020 IEEE Eighth International Conference on Communications and Networking (ComNet), pp. 1-5 Hammamet, Tunisia, 2020.
- [13] X. Tan, Z. Sun, J. M. Jornet and D. Pados, Increasing indoor spectrum sharing capacity using smart reflect-array. *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1-6, Kuala Lumpur, Malaysia, 2016.
- [14] Y. Zou, S. Gong, J. Xu, W. Cheng, D. T. Hoang and D. Niyato, Wireless powered intelligent reflecting surfaces for enhancing wireless communications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69 (10), 12369-12373, 2020. <https://www.doi.org/10.1109/TVT.2020.3011942>
- [15] C. Qiu, Q. Wu, M. Hua, W. Chen, S. Ma, F. Hou, D. W. K. Ng and A. L. Swindlehurst, Intelligent Reflecting Surface Empowered Self-Interference Cancellation in Full-Duplex Systems. in *IEEE Transactions on Communications*. 72 (5), 2945-2958, 2024. <https://www.doi.org/10.1109/TCOMM.2023.3347576>
- [16] SMV1247-SMV1255 Series: Hyperabrupt Junction Tuning Varactors data sheet. https://www.skyworksinc.com/-/media/SkyWorks/Documents/Products/101-200/SMV1247_SMV1255_Series_200061W.pdf





Akışkan viskoz sönümleyicilerin bitişik nizamlı betonarme binalarda gerekli boşluk mesafesine etkisi

The effect on required gap distance in adjacent reinforced concrete buildings of fluid viscous dampers

Esra Özer^{1,*} 

¹ Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 60250, Tokat Türkiye

Öz

Çalışmada bitişik nizamlı betonarme binalarda akışkan viskoz sönümleyici (FVD) kullanımı ile geleneksel ankastre mesnetli modellere göre gerekli derz mesafesinin değişimi incelenmiştir. Ayrıca Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) hükümlerine göre önerilen gerekli derz mesafesinin yeterliliği irdelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda 3 ve 7 katlı geleneksel ankastre mesnetli ve FVD sönümleyiciye sahip bitişik nizamlı konut binaları modellenmiştir. Yapısal elemanların ve FVD sönümleyicilerin doğrusal olmayan davranışı dikkate alınmıştır. Toplam 44 adet zaman tanım alanında dinamik analiz, spektrum uyumlu olarak seçilen 11 adet kayıt takımı kullanılarak ankastre mesnetli geleneksel model ve FVD sönümleyiciye sahip bitişik nizamlı modeller için toplam 44 adet zaman tanım alanında dinamik analiz yapılmıştır. Analizler sonucunda, FVD sönümleyici kullanımının gerekli derz mesafesini ankastre mesnetli modele göre ortalama %43.6 azalttığı görülmüştür. Ayrıca geleneksel ankastre mesnetli binalar için TBDY-2018'de önerilen boşluk mesafesinin %32.7 yetersiz kalırken, FVD kullanımı ile %42.2 güvenli tarafta kaldığı belirlenmiştir. Bu yönüyle yeni yapılacak veya güçlendirilecek mevcut bitişik nizamlı binalar için FVD sönümleyici kullanımının çekiçleme etkilerinin önlenmesi veya azaltılması için efektif bir alternatif olabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Akışkan viskoz sönümleyici, Bitişik nizam, Gerekli derz mesafesi, Doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz

1 Giriş

Özellikle kent merkezlerinde yetersiz boşluk mesafesine sahip pek çok betonarme bina mevcuttur [1]. Bitişik nizamlı binalar arasında yeterli boşluk mesafesinin bırakılmaması deprem etkileri altında bu binaların birbiriyle çarpışarak kısmen veya tamamen göçme durumuna ulaşmasına neden olabilmektedir [2-4]. Nitekim geçmiş depremlerin ardından hasarlı binalarda yapılan incelemelerde, çekiçleme etkilerinin diğer hasar nedenleri arasında önemli bir paya sahip olduğu raporlanmıştır [5-7]. Bu nedenle ulusal ve uluslararası yönetmeliklerde, bu etkiyi önlemek veya azaltmak amacıyla bitişik nizamlı binalar arasında bırakılması gereken minimum boşluk mesafesinin

Abstract

In the study, the change in the required gap distance with the use of fluid viscous damper-(FVD) in adjacent reinforced concrete buildings compared to traditional fixed-base models was examined. Additionally, the adequacy of the required gap distance recommended respect to the provisions of the Turkish Building Earthquake Code-(TBEC-2018) was examined. For this purpose, 3- and 7-story residential buildings with conventional fixed-base and FVD dampers were modelled. Nonlinear behavior for structural elements and FVD dampers was considered. A total of 44 nonlinear time history analysis was carried out for the conventional model with fixed-base and with FVD dampers adjacent model, using 11 ground motion pairs selected as spectrum compatible. As a result of the analysis, it was calculated that the use of FVD damper reduced the required gap distance by average of 43.6% compared to the fixed-base model. Additionally, it was determined that while the gap distance recommended in TBDY-2018 was 32.7% insufficient for fixed base buildings, was 42.2% remained on the safe side with the use of FVD. In this respect, it has been concluded that the use of FVD dampers can be an effective alternative to prevent or reduce the effects of pounding for existing or new adjacent buildings.

Keywords: Fluid viscous damper, Adjacent building, Required gap distance, nonlinear time-history analysis

belirlenmesi için çeşitli öneri ve formülasyonlar geliştirilmiştir. Ancak yapılan çalışmalarda yönetmeliklerde belirtilen boşluk mesafelerinin de yetersiz kalabildiği durumlar görülmüştür [8-11]. Bu nedenle mevcut hesap yöntemleri geliştirilmeye çalışılırken daha farklı alternatif arayışlarına da devam edilmektedir.

Kat deplasmanlarını sınırlandırarak, bina sismik performansını iyileştirme özelliğine sahip olan pasif enerji dağıtıcı cihazlar, çekiçleme etkilerinin engellenmesi veya azaltılmasında da önemli bir teknolojik alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır [12]. Ülkemizde kullanımının giderek yaygınlaşması ile yeni binaların tasarımında ve mevcut binaların güçlendirilmesinde yer alan pek çok pasif enerji

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: esra.ozer@gop.edu.tr (E. Özer)

Geliş / Received: 11.06.2024 Kabul / Accepted: 02.08.2024 Yayımlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1499280

dağıtıcı türü mevcuttur. Bunlar arasında özellikle akışkan viskoz sönümleyiciler (FVD) erişim, üretim ve montaj kolaylığı ile ön plana çıkmaktadır. Ayrıca, bu sönümleyicilerin bina periyotunu önemli ölçüde değiştirmeden yapının deplasman taleplerini azaltması, depremin frekans içeriğine ve sıcaklığa duyarlılığının az olması, mevcut yapının kullanımına devam edilirken kurulumunun gerçekleştirilebilmesi, konum, konfigürasyon ve boyut seçimi açısından tasarımcıya daha fazla esneklik sağlaması gibi özellikleri görece daha çok tercih edilmesini sağlamaktadır [13].

Çekiçleme davranışı ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, genellikle yetersiz boşluk mesafeli bitişik nizamlı binaların salınım periyotlarının farklı olması durumunda çekiçlemenin görülebileceği vurgulanmaktadır [14-15]. Bunlarla birlikte bina ağırlığı, yüksekliği, binaların düzenli olup olmaması ve düzensizlik durumunda birbirlerine göre eksantrisite durumlarının çekiçleme davranışı üzerinde etkili olduğu ifade edilmiştir [16]. Özellikle çekiçleme ve burulma etkilerinin bir arada görüldüğü ve bina rijitlik merkezlerinin birbirlerine göre aynı doğrultu ve yönde olduğu durumlarda yapısal hasarın daha kritik olduğu vurgulanmıştır [17]. Binaların çekiçleme davranışı altında birbirlerine etkime noktası ise döşemeden döşemeye veya döşemeden kolona olarak iki farklı başlık altında irdelenmektedir. Özellikle döşemeden kolona etkime durumunda kolon elemanların kapasitesinin üzerinde kesme kuvvetine ve süneklik talebine maruz kalarak bu durumun kolon elemanda veya sistemde kısmen veya tamamen göçmeye neden olabileceği ifade edilmiştir [16, 18].

Bunlardan farklı olarak, bitişik nizamlı yapılar arasında bırakılması gereken boşluk mesafesi konusunda çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda genellikle tek serbestlik dereceli sistemler üzerinde yoğunlaşarak çok serbestlik dereceli sistemler için de uygulanabilir yöntem önerileri sunulmuştur [19, 20]. Üç boyutlu binalar üzerinde Favvata tarafından yapılan çalışmada aynı ve farklı kat yüksekliklerine sahip betonarme binalar arasında bırakılması gereken minimum boşluk mesafesinin, dikkate alınan görelî ötelenme sınır koşuluna ve sismik tehlike seviyesine bağlı olduğu belirtilmiştir [21]. Flenga ve Favvata, yapısal elemanların elastik olmayan lokal taleplerinin olasılıksal değerlendirmesine dayanan başka bir yaklaşım geliştirmiştir [22]. Bu amaçla doğrusal ve çoklu doğrusal regresyon analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar betonarme 8 katlı bir binanın narinlik eğrileri ile sınırlı olsa da bu alanda yapılan ilk gerçekçi olasılıksal çalışma olmuştur. Aynı ve farklı kat yüksekliklerine sahip bitişik nizamlı binalarda, yapı elemanlarının lokal elastik olmayan davranışları eş zamanlı olarak dikkate alınmış ve olasılıksal olarak değerlendirilmiştir. Doğrusal olmayan davranışın göz ardı edilmesinin güvenli olmayan tasarım ya da değerlendirme yapılmasına neden olabileceği ifade edilmiştir [23].

Akışkan viskoz sönümleyici ile yapılan çalışmalar irdelendiğinde doğrusal olmayan özelliğe sahip sönümleyicilerin, doğrusal sönümleyicilere göre sismik performansı daha fazla iyileştirdiği görülmüştür [24-26]. Guo vd. mevcut yapıların güçlendirilmesinde FVD kullanımının oldukça efektif bir yöntem olduğunu

vurgulamıştır [27]. Yapılan diğer çalışmalarda ise, FVD sönümleyici kullanımının burulma ve geri çekme düzensizlik etkilerini ihmal edilebilir düzeye indirgeceği ifade edilmiştir [24, 28].

Akışkan viskoz sönümleyici ve çekiçleme etkilerinin birlikte değerlendirdiği çalışmalar irdelendiğinde ise, Elwardany vd. bitişik nizamlı çelik binalarda FVD kullanımını 3 deprem kaydı kullanarak incelemiştir [29]. Çekiçleme etkilerinin azaltılmasında binalarda kullanılan FVD sönümleyicilerin oldukça etkili olduğu ifade edilmiştir. Rayegani ve Nouri taban kotunda sismik izolatörlerle birlikte ilave sönümleyici kullanımının bitişik nizamlı yapılarda muhtemel çekiçleme etkilerini önemli oranda azalttığı, belirli boşluk mesafeleri için de çekiçleme oluşumunu tamamen engellediği sonucuna ulaşmıştır [30]. Kandemir [31] tarafından yapılan çalışmada yer değiştirmeyi sınırlayarak çekiçleme kuvvetini sıfıra indirgeyen minimum doğrusal viskoz sönümleyici kapasitesi optimizasyon yoluyla hesaplanmıştır. Bu çalışmada ilk defa dalgacık dönüşümü analizi ile çarpışmanın olduğu ve olmadığı durumlar arasında uyum katsayıları hesaplanmıştır. Uyum katsayısı 1'e yakınsayana kadar sisteme eklenmesi gereken ek sönüm oranı kademeli olarak artırılıp optimum sönümleyici kapasitesi hesaplanmıştır. Hesaplanan sönüm sisteme eklendiğinde çarpışmanın olmadığı görülmüştür. Kandemir başka bir çalışmada [32], alternatif optimum viskoz sönümleyici hesabı önermiştir. Bu çalışmada dalgacık uyumu yöntemi hem darbe durumlarının tahmini hem de optimum viskoz sönümleyici boyutunun belirlenmesinde kullanılmıştır. Oldukça efektif bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır. Kandemir-Mazanoğlu ve Mazanoğlu optimum viskoz sönümleyici kapasitesini ve sayısını araştırmıştır [33]. Bu amaç doğrultusunda modellere ait kat sayısı ve rijitlik parametreleri değiştirilerek, hesaplanan darbe kuvvetleri ve optimum viskoz sönümleyici kapasitesindeki değişim karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Bu çalışmada ise; gerekli derz mesafesinin belirlenmesinde, FVD sönümleyici kullanımının, geleneksel ankastre mesnetli modele göre etkisi araştırılmıştır. Ayrıca Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY-2018) [34] bitişik nizamlı yapılar için önerilen boşluk mesafesinin yeterliliği ankastre mesnetli bitişik nizamlı geleneksel betonarme bina modeli ve akışkan viskoz sönümleyiciye sahip bitişik nizamlı modeller için irdelenmiştir. Üç boyutlu modellerin yapısal elemanlarında ve akışkan viskoz sönümleyicilerde doğrusal elastik olmayan davranış dikkate alınarak gerçekçi bir yaklaşım geliştirilmeye çalışılmıştır. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler 11 adet spektrum uyumlu kayıt takımı kullanılarak SAP2000 [35] programında yapılmıştır. Çalışmadan elde edilen bulguların olası yönetmelik değişiklikleri için önemli bir altlık oluştururken, güvenilir ve hızlı kentsel dönüşüm çalışmalarında tasarım/uygulama mühendislerine de farklı bir bakış açısı kazandıracakı düşünülmektedir.

2 Materyal ve metot

2.1 Geleneksel ankastre mesnetli modeller

Ülkemiz bina stokunun düşük ve orta yükseklikli betonarme binalardan oluştuğu bilinmektedir [36-38].

Ayrıca muhtemel çekiçleme etkilerinin farklı bina yüksekliği, ağırlık ve periyot değerine sahip farklı dinamik karakteristikteki yapılar arasında görülmesinin kuvvetli muhtemel olduğu ifade edilmektedir [39-41]. Bu nedenle çalışma kapsamında ülkemiz yapı stokunu temsilen farklı dinamik karakteristiğe sahip 3 ve 7 katlı tipik betonarme konut binaları seçilmiştir. İlgili binaların modellenmesi TBDY-2018 [31] hükümleri dikkate alınarak yapılmıştır. Beton sınıfı ve donatı sınıfı sırasıyla C30 ve S420 olarak seçilmiştir. Yapısal elemanlara ait tipik kesitlerde; boyut ve donatı detayları **Tablo 1**'de verilmiştir. Kiriş kesitlerine ait alt (a) ve üst montaj (ü) donatıları ayrıca belirtilmiştir. Çerçeve taşıyıcı sisteme sahip olan binalarda perde eleman kullanılmamıştır. Kat döşemelerinin münferit ağırlıkları ve üzerine gelen yükler hesaplanarak, bağlı oldukları kirişlere düzgün yayılı yük olarak etki ettirilmiştir, döşemeler ayrıca modellenmemiştir. Benzer şekilde duvar yükleri TS-498'e uygun olarak belirlenmiş ve bağlı oldukları kirişlere düzgün yayılı yük olarak etki ettirilmiştir [42]. Modellemede rijit diyafram kabulü yapılmıştır. Yatayda ve düşeyde hiçbir düzensizlik içermeyen modellerin kalıp plan görünüşleri **Şekil 1**'de verilmiştir. Bina modellerinin Denizli il sınırları içerisinde ZC zemin sınıfı üzerinde konumlandığı varsayılmıştır. Binaların tasarımı 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan tasarım depremi düzeyinde (DD-2) gerçekleştirilmiştir.

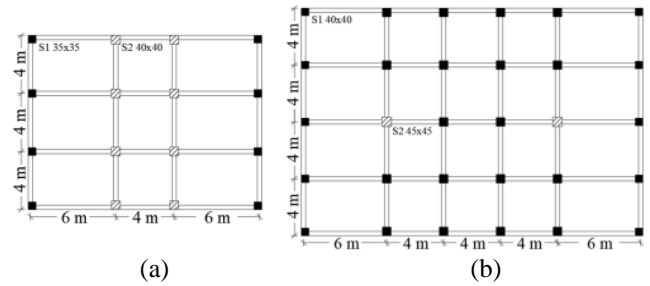
Tablo 1. Kesit özellikleri

Model	Kesit Boyutu (cmxcm)	Kesit Türü	Boyuna Donatı	Enine Donatı	Eksenel Yük (t)
3-katlı	35x35	Kolon	8φ16	2φ8/15/10	39.2
3-katlı	40x40	Kolon	8φ16	2φ8/15/10	62.3
3-katlı	30x50	Kiriş	3φ14 (ü) 3φ14 (a)	2φ8/20/10	0
7-katlı	40x40	Kolon	8φ16	2φ8/15/5	100.3
7-katlı	45x45	Kolon	12φ16	3φ8/15/10	267.2
7-katlı	30x50	Kiriş	3φ14 (ü) 3φ14 (a)	2φ8/20/10	0

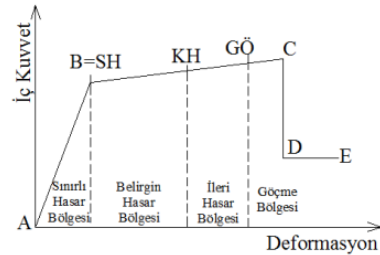
Yapısal elemanlara doğrusal olmayan davranış, kolon ve kiriş eleman uçlarında tanımlanan yığılı plastik mafsallar aracılığıyla modele yansıtılmıştır. Plastik mafsallı boyu, TBDY-2018 [34] hükümlerinde ifade edildiği gibi ilgili kesit yüksekliğinin yarısı (h/2) olarak dikkate alınmıştır. Plastik mafsallın tipik dayanım-deformasyon ilişkisi ve kesit hasar bölgeleri **Şekil 2**'de verilmiştir. Kesit hasar bölgelerine ve sınırlarına ait detaylı bilgiler ilgili yönetmelik hükümlerinde yer almaktadır. Kesitlere ait moment-eğrilik analizleri Mander sargılı beton modeli [43] için Sargı Etkisi Modelleme Analiz Programı'nda (SEMAP) [44] yapılmıştır. Elde edilen eğrilik değerlerinden dönme değerleri hesaplanarak sismik analizlerin yapılacağı SAP2000 [35] programında kullanıcı tanımlı plastik mafsallı arayüzünde kullanıma hazır hale getirilmiştir. Kolon ve kiriş kesitleri için etkin eğilme rijitlikleri sırasıyla 0.70 ve 0.35 olarak dikkate alınmıştır.

2.2 Akışkan viskoz sönümleyiciler

Deprem mühendisliğindeki teknolojik çalışmalar, sismik performansı iyileştirici ve mevcut yöntemlere göre daha ekonomik ve fizibilitesi daha yüksek yöntem, teknik, malzeme, cihaz vb. arayışını sürdürmektedir. Mevcut yapıların güçlendirilerek tarihi dokunun korunması, sürdürülebilir kent ve hayat anlayışı ile depreme dayanıklı şehirlerin kurulması özellikle deprem kuşağında bulunan ülkemiz için oldukça kritik bir hâl almıştır. Bu yönüyle akışkan viskoz sönümleyiciler; erişilebilirlik, tasarım kolaylığı, işlevsellik ve tahliye gerektirmeden kurulum kolaylığı ile belirli yönetmelik standartlarına sahip güçlendirilebilir mevcut binalar ve yeni tasarlanacak binalar için oldukça efektif bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır.

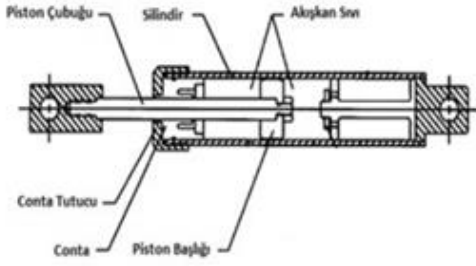


Şekil 1. Modellerin ait plan görünüşleri (a) 3 katlı, (b) 7 katlı



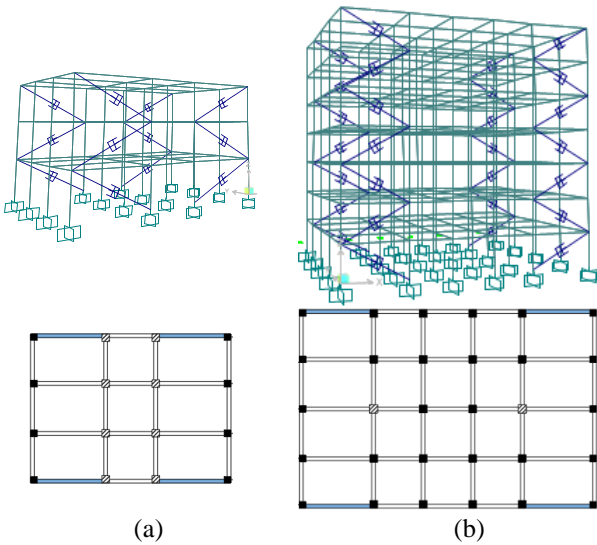
Şekil 2. Tipik dayanım-deformasyon ilişkisi

Tipik bir akışkan viskoz sönümleyici; piston, silindir odası ve özel bir sıvıdan oluşur (**Şekil 3**). Yapıyla sönümleyicinin bağlantısını sağlayan sabit ve hareketli iki farklı kısım bulunur. Herhangi bir dinamik etki anında pistonun ileri ve geriye doğru hareketi, piston kafasında bulunan delikler ile özel sıvının silindir odasında hıza bağlı hareketini sağlar. Bu hareket silindir odasında ana basıncı meydana getirir. Yalnızca hareket halinde hıza bağlı oluşan direnç kuvveti yapıya rijitlik katmadan ve herhangi bir statik yük taşımadan FVD sönümleyicilerin çalışma prensibini oluşturur. Oluşan direnç kuvvetinin büyüklüğü hızla doğru orantılı olup **Denklem (1)**'deki gibi formülize edilir.



Şekil 3. Akışkan viskoz sönümleyici bileşenleri [13]
Sönüm Kuvveti = Sönüm Sabiti (C) * Hız^α (1)

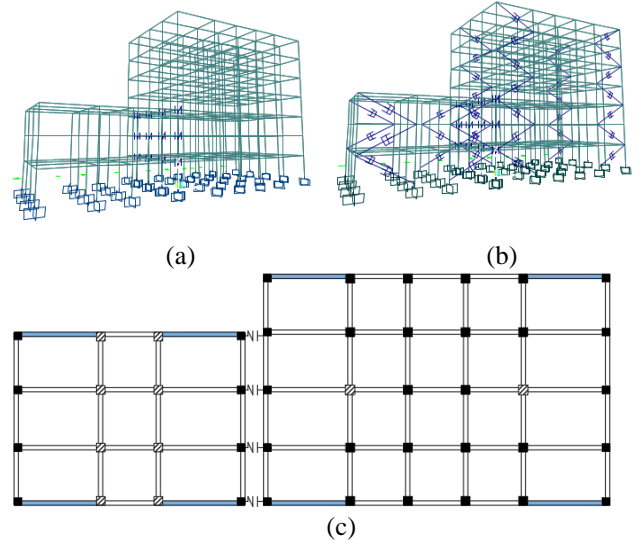
Bu çalışma için sönüm sabiti (C) 100 kips-(sn/in), yay sabiti (K) 2000 kips (sn/in) ve sönüm üssü (α) 0.5 olarak dikkate alınmıştır. İlgili parametreler detaylı ve çok aşamalı bir ön tasarımdan ziyade üretici firmaların tasarım kataloglarında yer alan ve genel kıstasları sağladığı düşünülen sönümleyiciler arasından seçilmiştir [36]. Ankastré mesnetli geleneksel modellere sönümleyiciler Maxwell yöntemi ile dahil edilmiştir. Bina yüksekliği boyunca diyagonal olarak muhtemel çarpışma doğrultusunda (X doğrultusu) yerleştirilen sönümleyicilerin kalıp planındaki ve üç boyutlu (3B) görünümdeki lokasyonu Şekil 4’te verilmiştir. FVD elemanların lokasyon seçiminde, mevcut yapılar arasında FVD yerleşimi için yeterli boşluk mesafesi olmadığı düşünülerek bina yüksekliği boyunca bir yerleşim planı uygulanmıştır [1, 45]. Ancak daha önce yapılan çalışmalar dikkate alındığında, binalar arasında sönümleyici kullanımının da oldukça efektif bir çözüm sunduğunu söylemek mümkündür [46]. Bina yüksekliği boyunca sönümleyici yerleşiminde ise literatürde sıkça yer alan bina köşe noktalarında, burulma düzensizliğine neden olmayacak şekilde kütle ve rijitlik merkezlerine göre simetrik bir dağılım planlanmıştır [24, 47]. FVD elemanların yerleşiminde taban alanı ve rijitliğe göre oransal bir değerlendirme yapılmamıştır.



Şekil 4. FVD sönümleyicilerin lokasyonları (a) 3 katlı ve (b) 7 katlı

2.3 Bitişik nizamlı modeller ve link elemanlar

Oluşturulan ankastré mesnetli modeller kendi içinde ve FVD sönümleyiciye sahip modeller de kendi içinde olmak üzere bitişik nizamlı modeller türetilmiştir. İlgili modeller link elemanlar aracılığıyla birbirine bağlanmıştır. Aynı kat yüksekliğine sahip modeller için döşemeden döşemeye bir bağlantı kurulmuştur (Şekil 5). Kullanılan link elemanda Kelvin modeli benimsenmiştir (Şekil 6). Bu modele göre link eleman, doğrusal bir yay, viskoz sönüm ve bitişik nizamlı binalar arasındaki boşluk mesafesi ile tanımlanabilmektedir. Binalar arasında bir kuvvet (F) aktarımının gerçekleşebilmesi için tanımlanan boşluk mesafesinin (g_p) yetersiz olması (iki bina arası deplasman farkından (u₁-u₂) büyük olması) gerekmektedir. Çünkü ilgili link eleman modeli Denklem (2)’deki gibi sadece sıkışma (basınç) durumunda bir kuvvet oluşturup, çekme durumunda kuvvet oluşturmamaktadır. Gerekli derz mesafesinin belirlenmesinde, binalar arasında çarpışma etkilerinin görülmemesi için binalar arasındaki boşluk mesafesi 1 metre olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 5. Bitişik nizamlı model görünümü (a) 3B-Ankastré model (b) 3B-FVD model ve (c) Link detayı

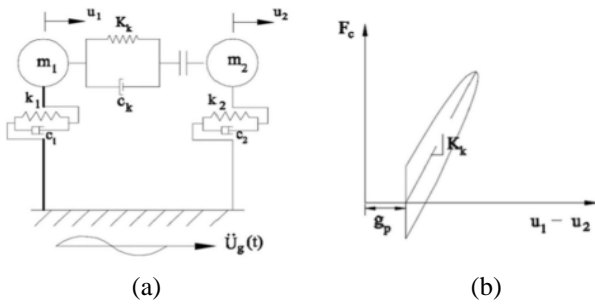
Bitişik nizamlı binaların aynı kat yüksekliğine sahip olması nedeniyle olası çarpışmalar kat seviyelerinde meydana gelmektedir. Her iki bina da rijit diyaframlara sahip olduğundan çarpışmanın iki rijit cisim arasında meydana geldiği varsayılmaktadır. Bu nedenle yay rijitliğinin (K_k), çarpışan katların eksenel rijitliklerinin toplamından büyük olması gerekir. Beton-beton çarpışmasını konu alan analitik ve deneysel çalışmalarda yay rijitlikleri yaklaşık 10¹⁰ N/m ile 10¹¹ N/m arasında alınmıştır. Bu çalışmada rijitlik değeri 10¹⁰ N/m olarak seçilmiştir. Binalar arasında çarpışma olmayacağı düşünüldüğünde belirlenen/seçilen link eleman rijitliğinin analizler sonucunda elde edilen deformasyonlar üzerinde etkisi olmayacağını söylemek mümkündür. Denklem 2-4’te, c_k, K_k, e, m₁ ve m₂ sırasıyla bağlantı elemanının viskoz sönüm katsayısını, yay rijitliğini, enerji verimlilik katsayısını ve bitişik binaların kütlelerini temsil etmektedir. Birçok çalışmada beton-beton çarpışması için e

katsayısı 0,65 olarak alınmıştır. Bu katsayının sönüm oranı değeri (ξ) 0,136 olarak elde edilmiştir. 3 katlı ve 7 katlı binaların sismik ağırlıkları sırasıyla 4623.6 kN ve 19885.5 kN olarak hesaplanmıştır. Bu ağırlıklar için tüm link eleman özellikleri belirlenmiştir.

$$F = \begin{cases} K_k(u_1 - u_2 - g_p) + c_k(\dot{u}_1 - \dot{u}_2), & (u_1 - u_2) \geq g_p \\ 0, & (u_1 - u_2) < g_p \end{cases} \quad (2)$$

$$c_k = 2\xi \sqrt{K_k \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}} \quad (3)$$

$$\xi = -\frac{\ln(e)}{\sqrt{\pi^2 + (\ln(e))^2}} \quad (4)$$

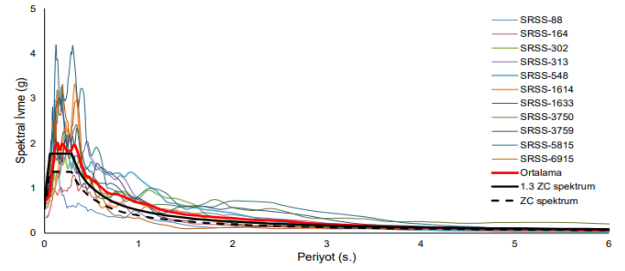


Şekil 6. (a) Kelvin modeli ve (b) kuvvet-deformasyon ilişkisi [48]

3 İvme kaydı seçimi ve analiz detayları

Çalışmada kullanılan bina modellerinin Denizli ilinde kayma dalgası hızı (V_{s30}) 360-760 m/s olan ZC zemin sınıfı üzerinde yer aldığı varsayılmıştır. İlgili lokasyonda tekrarlanma süresi 475 yıl olan deprem düzeyine (DD-2) göre kısa periyot için harita spektral ivme değeri (S_s) ve 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme değeri (S_I) sırasıyla 1.135, 0.261 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde kısa periyot tasarım spektral ivme değeri (S_{Ds}) ve 1.0 s. periyot için tasarım spektral ivme değeri (S_{DI}) ise sırasıyla 1.135, 0.658 olarak belirlenmiştir. Elde edilen katsayılar aracılığıyla TBDY-2018'e göre tasarım spektrumu oluşturulmuştur.

İlgili yönetmelik hükümlerince 3B binalar, spektrum uyumlu en az on bir adet kayıt takımı kullanılarak zaman tanım alanında dinamik analize tâbi tutulmalıdır. Seçilen kayıt takımlarının her iki yatay bileşeni aynı ölçek katsayısı ile ölçeklendirilerek karelerinin toplamının karekökü (SRSS) ortalama değerleri belirli periyot aralığı için tasarım spektrumunun 1.3 katından az olmaması gerekmektedir. Ayrıca belirli bir deprem için en fazla üç farklı kayıt istasyonundan kayıt kullanılabilir. İlgili gereklilikler göz önünde bulundurularak seçim ve ölçeklendirme işlemlerinin tümü PEER Ground Motion Database [49] veri tabanında gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılmak üzere seçilen ve ölçeklendirilen deprem kayıtlarına ait özellikler Özer [17] tarafından yapılan çalışmada detaylı olarak verilmiştir. Şekil 7'de ise tüm deprem kayıtlarının SRSS olarak elde edilen ortalama spektrum eğrileri, tasarım spektrumu ve hedef spektrum (tasarım spektrumunun 1.3 katı) eğrisi verilmiştir.



Şekil 7. Kullanılan deprem ivme kayıtlarının %5 sönüm için elastik ivme spektrumları

4 Analiz sonuçları

Çalışma kapsamında yapılan zaman tanım alanında dinamik analizler, TBDY-2018 hükümlerine uygun olarak seçilen ve ölçeklendirilen kayıt takımlarının her iki yatay bileşeni 3B modellere aynı anda birbirine ortogonal olacak şekilde uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Ankastre mesnetli ve FVD sönümleyiciye sahip modeller için toplam 44 adet zaman tanım alanında dinamik analiz yapılmıştır. Analizler sonucunda elde edilen link deformasyon değerleri kullanılarak ankastre mesnetli ve FVD sönümleyiciye sahip modeller için gerekli derz mesafesi hesaplanmıştır. Böylece, FVD sönümleyicinin gerekli derz mesafesi üzerindeki etkisi kolaylıkla yorumlanabilmektedir. Ayrıca TBDY-2018 hükümlerince önerilen derz mesafesinin yeterliliği, analizler sonucunda hesaplanan gerekli derz mesafesine göre tartışılmıştır.

4.1 Dinamik analizler ile hesaplanan gerekli derz mesafesi

Zaman tanım alanında dinamik analizler sonucunda elde edilen gerekli derz mesafelerinin modellere göre minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma değerleri Tablo 2'de her bir deprem kaydı için ayrı ayrı verilmiştir. Modeller için gerekli derz mesafesi oranları da tabloda yer almaktadır. Tablodaki veriler ışığında ortalama gerekli derz mesafesi ankastre mesnetli modelde 74.6 mm, FVD sönümleyiciye sahip modelde ise 34.1 mm olarak hesaplanmıştır. FVD kullanımı gerekli derz mesafesini ortalama %43.6 oranında azaltmıştır. Gerekli derz mesafesi FVD kullanımı ile minimum 1.1 kat, maksimum 4.6 kat azalmıştır. Ankastre mesnetli modellerde ivme kayıtlarına göre gerekli derz mesafesi en fazla 87.5 mm olarak hesaplanırken FVD sönümleyiciye sahip modelde en fazla 65.7 mm olarak hesaplanmıştır. Gerekli derz mesafesinin modellere göre ortalama değerleri önemli oranda farklılık gösterirken, standart sapma değerleri arasında ihmal edilebilir düzeyde bir farklılık gözlemlenmiştir. Her iki model içinde standart sapma değerleri yaklaşık ± 14.5 olarak hesaplanmıştır.

4.2 TBDY-2018'e göre binalar arasında gerekli derz mesafesinin belirlenmesi

TBDY-2018 hükümlerince; sadece deprem etkisi için mevcut ve yeni yapılacak bitişik nizamlı binalar arasında bırakılması gereken derz mesafesi, aşağıda verilen 3 farklı koşula göre tanımlanıp en elverişsiz duruma göre belirlenmektedir.

- i) Her bir kat için komşu blok veya binalarda elde edilen azaltılmış yer değiştirmelerin karelerinin toplamının karekökü ile deprem derz boşlukları için kullanılan ampirik α katsayısının çarpımı sonucunda bulunan değerden az olmayacaktır. Komşu binaların veya bina bloklarının kat döşemelerinin bütün katlarda aynı seviyede olmaları durumunda $\alpha = 0.25 (R / I)$ alınacaktır.
- ii) Mevcut eski bina için hesap yapılmasının mümkün olmaması durumunda eski binanın yer değiştirmeleri, yeni bina için aynı katlarda hesaplanan değerlerden daha küçük alınmayacaktır.
- iii) Bırakılacak minimum derz boşluğu, 6 m yüksekliğe kadar en az 30 mm olacak ve bu değere 6 m'den sonraki her 3 m'lik yükseklik için en az 10 mm eklenecektir.

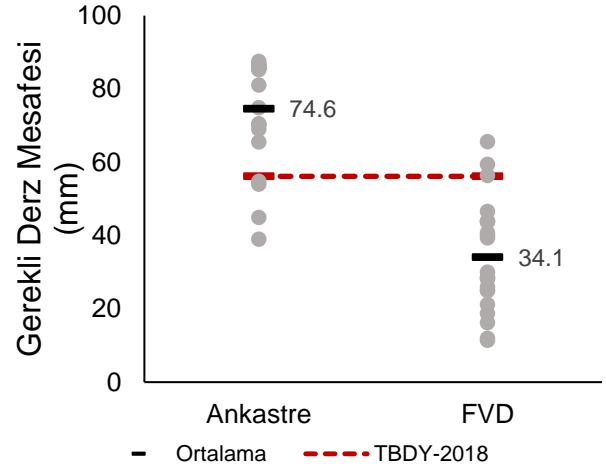
İlgili yönetmelik hükümleri göz önünde bulundurulacak çalışmada kullanılan 3.2 m kat yüksekliğine, çerçeve taşıyıcı sisteme (R=8) sahip 3 ve 7 katlı konut (I=1) binaları için gerekli derz mesafesi verilen üç madde için sırasıyla 50.4, 56.2 ve 42.0 mm olarak hesaplanmıştır. En elverişsiz durum dikkate alındığında 3 ve 7 katlı binalar için bırakılması gereken derz mesafesi 56.2 mm olarak belirlenmiştir. TBDY-2018'de yer alan derz mesafe hesapları ankastre mesnetli modeller için verilmiş olup, pasif enerji dağıtıcıya sahip modeller için herhangi bir hüküm yer almamaktadır. Bu nedenle ankastre mesnetli model için hesaplanan derz mesafeleri, FVD sönümleyiciye sahip modeller için de geçerli kabul edilmiştir.

Tablo 2. Dinamik analizler sonucunda hesaplanan gerekli derz mesafeleri

Deprem Kaydı	Link Deformasyonu (mm)		Ankastre/FVD
	Ankastre Model	FVD Model	
RSN-88-0	54.8	12.0	4.6
RSN-88-90	39.0	11.5	3.4
RSN-1614-0	65.6	18.8	3.5
RSN-1614-90	70.4	25.1	2.8
RSN-1633-0	70.2	40.0	1.8
RSN-1633-90	86.0	43.8	2.0
RSN-164-0	69.1	16.3	4.2
RSN-164-90	70.6	21.2	3.3
RSN-302-0	86.5	46.6	1.9
RSN-302-90	86.1	28.3	3.0
RSN-313-0	85.6	26.1	3.3
RSN-313-90	86.0	59.4	1.4
RSN-3750-0	54.0	25.0	2.2
RSN-3750-90	85.8	28.6	3.0
RSN-3759-0	85.6	39.4	2.2
RSN-3759-90	74.9	28.3	2.6
RSN-548-0	87.5	56.4	1.6
RSN-548-90	86.1	65.7	1.3
RSN-5815-0	86.9	43.8	2.0
RSN-5815-90	85.2	43.9	1.9
RSN-6915-0	81.1	30.0	2.7
RSN-6915-90	45.0	40.8	1.1
Maksimum	87.5	65.7	1.1
Minimum	39.0	11.5	4.6
Ortalama	74.6	34.1	2.5
Standart Sapma	14.5	14.7	-

4.3 TBDY-2018'de önerilen derz mesafesinin yeterliliğinin tartışılması

Gerekli derz mesafesinin hesaplanmasında TBDY-2018'de önerilen derz mesafesi (56.2 mm), analizler sonucunda elde edilen ortalama derz mesafeleri ile Şekil 8'de karşılaştırılmıştır. Yönetmelikte önerilen derz mesafesi, ankastre mesnetli model için %32.7 yetersiz kalırken, FVD sönümleyiciye sahip model için %42.2 oranında güvenli tarafta kalmıştır. Analizler sonucunda ankastre mesnetli modellerin sadece üç deprem durumu için yönetmelik şartlarını sağladığı görülürken, FVD sönümleyiciye sahip modellerde sadece üç deprem durumu için yönetmelik sınırının aşıldığı belirlenmiştir. Bu durum, yönetmelikte ankastre mesnetli binalar için önerilen derz mesafesinin güvenli olmayan tasarım ve değerlendirmelere yol açabileceğinin bir göstergesi olarak yorumlanmıştır. Ayrıca FVD sönümleyicilerin literatürde ifade edilen deplasman taleplerinde ve görelî kat ötelenmelerindeki azaltıcı etkisinin bitişik nizamlı yapılarda da oldukça önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Bu nedenle yeni tasarlanacak veya gerekli standartları sağlayan ve güçlendirilmesi planlanan bitişik nizamlı mevcut yapıların FVD sönümleyicilerle olası çekişleme etkilerini önemli oranda azaltarak sismik performansını iyileştirilebileceğini söylemek mümkündür. Bu yönüyle FVD sönümleyicilerin hızlı ve güvenli bir kentsel dönüşüm için gerekli koşulları sağlayan mevcut ve yeni tasarlanacak binalarda iyi bir alternatif olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 8. Gerekli derz mesafelerinin karşılaştırılması

5 Sonuçlar

Yapılan çalışmada bitişik nizamlı geleneksel ankastre mesnetli binalar arasında bırakılması gerekli derz mesafesinin, FVD kullanımı ile değişimi irdelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda öncelikle 3 ve 7 katlı geleneksel ankastre mesnetli modeller oluşturulmuştur. Ardından akışkan viskoz sönümleyiciler modellere eklenmiştir. Son olarak, oluşturulan ankastre mesnetli modeller kendi içinde, FVD sönümleyiciye sahip modeller kendi içinde olmak üzere Kelvin link elemanı kullanılarak bitişik nizamlı modeller türetilmiştir. Yapısal elemanlarda ve FVD sönümleyicilerde doğrusal olmayan davranış dikkate

alınarak toplam 44 adet zaman tanım alanında dinamik analiz yapılmıştır.

Analizlerden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde geleneksel ankastre mesnetli modelde FVD kullanımı ortalama gerekli derz mesafesini %43.6 azaltmıştır. Yine ortalama değerler açısından hesaplanan gerekli derz mesafeleri TBDY-2018 yönetmeliğinde önerilen derz mesafesine göre ankastre mesnetli model için %32.7 yetersiz kalırken, FVD sönümleyiciye sahip model için %42.2 oranında güvenli tarafta kalmıştır. Bu yönüyle FVD sönümleyicilerin bitişik nizamlı yeni binaların tasarımında ve güçlendirilmesi planlanan binalarda sismik performansın iyileştirilmesi amacıyla efektif bir çözüm sunabileceği düşünülmektedir. İleride yapılacak çalışmalar için model çeşitliliğinin artırılarak sonuç güvenilirliğinin artırılması önerilmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %17

Kaynaklar

- [1] M. Doğan ve A. Günaydın, Pounding of adjacent RC buildings during seismic loads. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi. 22(1), 129-145, 2009.
- [2] M. Miari, K.K. Choong and R. Jankowski, Seismic pounding between adjacent buildings: Identification of parameters, soil interaction issues and mitigation measures. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 121, 135-150, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.02.024>.
- [3] E. Rosenblueth and R. Meli, The 1985 Mexico earthquake. Concrete International, 8:23–34, 1986.
- [4] M.R. Degg, Some implications of the 1985 Mexican earthquake for hazard assessment. In Geohazards: Natural and man-made. Dordrecht: Springer Netherlands, 105-114, 1992. https://doi.org/10.1007/978-94-011-2310-5_11
- [5] R. Valles-Mattox and A. Reinhorn, Evaluation, prevention and mitigation of pounding effects in building structures. State University of New York at Buffalo Department of Civil Engineering Buffalo, NY 14260, Technical Report NCEER-97-0001, 20 February 1996.
- [6] S. Anagnostopoulos, Building pounding re-examined: how serious a problem is it. The eleventh world conference on earthquake engineering, pp. 2101-2108, Patras, Greece, 1996.
- [7] S. Anagnostopoulos, Earthquake induced pounding: State of the art. 10th European conference on earthquake engineering, pp. 897–905, Vienna, Austria 28 August-2 September 1995.
- [8] M. Miari and R. Jankowski, Analysis of floor-to-column pounding of buildings founded on different soil types. Bulletin of Earthquake Engineering, 20(13), 7241-7262, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01482-0>.
- [9] V. Jeng and W.L. Tzeng, Assessment of seismic pounding hazard for Taipei City. Engineering Structures, 22(5), 459-471, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(98\)00123-0](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(98)00123-0).
- [10] G. Cole, R. Dhakal, A.J. Carr and Bull D, Building pounding state of the art: Identifying structures vulnerable to pounding damage, 2010 New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference, pp. 11-19, Napier, New Zealand, 2010.
- [11] E. A. Mavronicola, P.C. Polycarpou and P. Komodromos, Spatial seismic modeling of base-isolated buildings pounding against moat walls: effects of ground motion directionality and mass eccentricity. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 46(7), 1161-1179, 2017. <https://doi.org/10.1002/eqe.2850>
- [12] B. I. Patil, B. B. Biradar and R. Doddamani, Mitigation of seismic pounding observed in adjacent buildings with fluid viscous damper. In Sustainability Trends and Challenges in Civil Engineering: Select Proceedings of CTCS 2020, Springer Singapore, pp. 711-731, 2022. , https://doi.org/10.1007/978-981-16-2826-9_45
- [13] Taylor devices inc, Fluid viscous dampers general guidelines for engineers including a brief history, Taylor devices inc., New York, USA, 2020.
- [14] M. Miari, K. K. Choong and R. Jankowski, Seismic pounding between adjacent buildings: Identification of parameters, soil interaction issues and mitigation measures. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 121, 135-150, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.02.024>
- [15] D. Isobe, T. Ohta, T. Inoue and F. Matsueda, Seismic pounding and collapse behavior of neighboring buildings with different natural periods. Natural Science 4: 686-693, 2012. <http://dx.doi.org/10.4236/ns.2012.428090>
- [16] A. Elgammal, A. Seleemah, M. Elsharkawy and H. Elwardany, Comprehensive review on seismic pounding between adjacent buildings and available mitigation measures. Archives of Computational Methods in Engineering, 1-36, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11831-024-10114-6>
- [17] E. Ozer, Seismic pounding of adjacent buildings considering torsional effects. Bulletin of Earthquake Engineering, 22, 2139–2171, 2024, <https://doi.org/10.1007/s10518-023-01849-x>.
- [18] C. G. Karayannis, and M. C. Naoum, Torsional behavior of multistory RC frame structures due to asymmetric seismic interaction. Engineering Structures, 163, 93-111, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.038>
- [19] V. Jeng, K. Kasai, B.F. Maison. A spectral difference method to estimate building separations to avoid pounding. Earthquake Spectra, 8:201–223, 1992. <https://doi.org/10.1193/1.1585>
- [20] M. Barbato, E. Tubaldi, A probabilistic performance-based approach for mitigating the seismic pounding risk between adjacent buildings. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 42, 1203-1219, 2013. <https://doi.org/10.1002/eqe.2267>

- [21] M. J. Favvata, Minimum required separation gap for adjacent RC frames with potential inter-story seismic pounding. *Engineering Structures*, 152, 643–659, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.09.025>
- [22] M. G. Flenga, M.J. Favvata, Probabilistic seismic assessment of the pounding risk based on the local demands of a multistory RC frame structure. *Engineering Structures* 245:112789, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112789>
- [23] C.G. Karayannis and M.C. Naoum Torsional behavior of multistory RC frame structures due to asymmetric seismic interaction. *Engineering Structures*, 163:93–111, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.038>
- [24] E. Ozer, The effect of fluid viscous dampers on performance of a residential building, early edition process in Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 2023. <https://doi.org/10.5505/pajes.2023.39345>
- [25] M. Martinez-Rodrigoand, M. L. Romero, An optimum retrofit strategy for moment resisting frames with nonlinear viscous dampers for seismic applications. *Engineering Structures*, 25(7), 913-925, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(03\)00025-7](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(03)00025-7)
- [26] A.H. Deringöl, E.M. Güneyisi and O. Hansu, Combined Effect of Bearing Stiffness of the Base Isolator and Damping Characteristics of the Viscous Damper on the Nonlinear Response of Buildings. *International Journal of Steel Structures*, 22(5), 1497-1517, 2022. <https://doi.org/10.1007/s13296-022-00656-5>
- [27] T. Guo, J. Xu, W. Xu, Z. Di, Seismic upgrade of existing buildings with fluid viscous dampers: Design methodologies and case study. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29(6), 04014175, 2015. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-509.0000671](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-509.0000671)
- [28] M. Hicyilmaz, M. Doğan, H. Gönen, Investigation of optimum viscous damper distribution in steel frames with set-back irregularities. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 24(6),1024-1029, 2018. <https://doi.org/10.5505/pajes.2017.69094>
- [29] H. Elwardany, R. Jankowski, and A. Seleemah, Mitigating the seismic pounding of multi-story buildings in series using linear and nonlinear fluid viscous dampers. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 21(4), 137, 2021. <https://doi.org/10.1007/s43452-021-00249-9>
- [30] A. Rayegani and G. Nouri, Application of smart dampers for prevention of seismic pounding in isolated structures subjected to near-fault earthquakes. *Journal of Earthquake Engineering*, 26(8), 4069-4084, 2022. <https://doi.org/10.1080/13632469.2020.1822230>
- [31] E. Ç. Kandemir, Dalgacık Uyum Analizi ile Optimum Viskoz Damper Kapasitesi Hesabı, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30(1), 115-122, 2022. <https://doi.org/10.31796/ogummf.1003961>
- [32] E. Ç. Kandemir, Alternate approach for calculating the optimum viscous damper size. *Gravevinar*, 75(02.), 153-162,2023. <https://doi.org/10.14256/JCE.3539.2022>
- [33] E. Ç. Kandemir-Mazanoglu, K. Mazanoglu, An optimization study for viscous dampers between adjacent buildings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 89, 88-96, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2016.06.001>
- [34] TBDY-2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. Ankara, Türkiye, 30364, 2018.
- [35] SAP2000 V-20 CSI. Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Basic Analysis Reference Manual. Berkeley, USA, 2020.
- [36] H. B. Ozmen, M. Inel, S. M. Senel , & A. H. Kayhan, Load carrying system characteristics of existing Turkish RC building stock. *International Journal of Civil Engineering*, 13(1),76-91, 2015.
- [37] H. B. Ozmen, M. Inel, Damage potential of earthquake records for RC building stock. *Earthq. Struct*, 10(6), 1315-1330, 2016. <http://dx.doi.org/10.12989/eas.2016.10.6.1315>
- [38] H. B. Ozmen, M. Inel, Effect of rapid screening parameters on seismic performance of RC buildings. *Structural engineering and mechanics: An international journal*, 62(4), 391-399, 2017. <https://doi.org/10.12989/sem.2017.62.4.391>
- [39] C. Zhai, S. Jiang, S. Li, L. Xie, Dimensional analysis of earthquake-induced pounding between adjacent inelastic MDOF buildings. *Earthq Eng and Eng Vib* 14:295–313, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11803-015-0024-3>.
- [40] R. Jankowski, Non-linear FEM analysis of earthquake-induced pounding between the main building and the stairway tower of the Olive View Hospital. *Eng Struct* 31(8):1851–1864, 2009, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.03.024>
- [41] C.G. Karayannis, M.C. Naoum, Torsional behavior of multistory RC frame structures due to asymmetric seismic interaction. *Eng Struct* 163:93–111, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.038>
- [42] TS498, Design Loads for Buildings. Turkish Standards Institution. Ankara, Turkey, 1997.
- [43] J. B. Mander, Seismic design of bridge piers. Research report 84-2. Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch (New Zealand), 1984.
- [44] SEMAp Sargı Etkisi Modelleme Analiz Programı, Tubitak Proje No: 105M024 Ankara, Turkey (in Turkish), 2008.
- [45] B.T. Cayci, M. Akpınar, Seismic pounding effects on typical building structures considering soil-structure interaction. In: *Structures*, vol 34. Elsevier, pp 1858–1871, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.133>
- [46] E. C. Kandemir & R. Jankowski, Effect of soil on the capacity of viscous dampers between adjacent buildings. *Gravevinar*,75, 329-342, 2023. <https://doi.org/10.14256/JCE.3597.2022>

[47] M. Mokhtari & H. Naderpour, Seismic vulnerability assessment of reinforced concrete buildings having nonlinear fluid viscous dampers. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(13), 7675-7704, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01508-7>

[48] S. Muthukumar, R. Desroches, Evaluation of impact models for seismic pounding. In: 13th world

conference on earthquake engineering, Vancouver, BC, Canada, 235, August 1–6, 2004.

[49] PEER Ground Motion Database <http://peer.berkeley.edu> (09.09.2019).





Derin öğrenme yöntemleri kullanılarak deri lezyon görüntülerinden Maymun Çiçeği hastalığının tespiti

Detection of Monkeypox disease from skin lesion images using deep learning methods

Muhammet Talha Engin¹ , Kemal Adem^{2,*} 

¹ Aksaray Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yönetim Bilişim Sistemleri Anabilim Dalı, 68100, Aksaray Türkiye

² Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği, 58100, Sivas, Türkiye

Abstract

Monkeypox is a disease that, while less deadly and contagious than COVID-19, could pose a global pandemic threat. In the field of medical imaging, deep learning techniques offer promising results in the diagnosis of diseases. This study develops deep learning models using skin lesion images for early diagnosis of monkeypox. The research is divided into two key sections. In the first section, a deep learning model is developed using the Monkeypox Skin Image Dataset (MSID). The second section focuses on a model trained on a combined dataset, which merges the Monkeypox Skin Image, Monkeypox Master, and Monkeypox Original Image Datasets, referred to as HYBRID. The MSID dataset comprises 806 Monkeypox and 690 Non-Monkeypox images for training, along with 309 Monkeypox and 292 Non-Monkeypox images for testing, resulting in a total of 2,097 images of skin lesions with and without monkeypox. The HYBRID dataset includes 1,088 Monkeypox and 1,896 Non-Monkeypox images for training, as well as 468 Monkeypox and 812 Non-Monkeypox images for testing, resulting in a total of 4,264 skin lesion images. Five distinct deep learning models—DenseNet201, InceptionResNetV2, InceptionV3, NASNetLarge, and Xception—were applied to both datasets, and the outcomes were compared. The DenseNet201 model, when trained on augmented data, demonstrated remarkable performance in detecting monkeypox, achieving accuracy rates of 99.33% on the MSID dataset and 98.52% on the HYBRID dataset.

Keywords: Monkeypox Disease, Virus, Deep Learning, DenseNet201

1 Introduction

Epidemics are diseases that spread independently of time and space with a high infection rate [1]. Historically, it is known that diseases such as cholera, plague, tuberculosis and leprosy spread throughout the world and to various regions [2]. The geographical location, natural beauties and riches of our country create a favorable environment for the emergence and spread of epidemic diseases. Epidemics caused by different reasons such as wars, commercial

Öz

Monkeypox, COVID-19 salgınına kıyasla daha az ölümcül ve bulaşıcı olsa da küresel bir salgın tehdidi oluşturabilen bir hastalıktır. Tıbbi görüntüleme alanında derin öğrenme teknikleri, hastalıkların teşhisinde umut verici sonuçlar sunmaktadır. Bu çalışma, monkeypox'un erken teşhisi için deri lezyon görüntülerini kullanarak derin öğrenme modelleri geliştirir. Çalışma iki ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm, Monkeypox Deri Görüntü Veri Seti (MSID) kullanılarak eğitilen bir derin öğrenme modelini tanıtırken, ikinci bölüm Monkeypox Deri Görüntü, Monkeypox Master ve Monkeypox Orjinal Görüntü Veri Setlerinden (HYBRID) oluşturulan birleştirilmiş bir veri seti ile eğitilen bir modeli sunar. MSID veri seti, toplamda 2097 resim içermektedir. Bu set, eğitim için 806 Monkeypox ve 690 Non Monkeypox, test için ise 309 Monkeypox ve 292 Non Monkeypox deri lezyon görüntüsünden oluşmaktadır. HYBRID veri kümesi ise toplamda 4264 resim içermektedir. Bu set, eğitim için 1088 Monkeypox ve 1896 Non Monkeypox, test için ise 468 Monkeypox ve 812 Non Monkeypox deri lezyon görüntüsünü barındırmaktadır. Bu veri setlerinin eğitiminde beş farklı derin öğrenme modeli- DenseNet201, InceptionResNetV2, InceptionV3, NASNetLarge ve Xception- bu iki veri seti üzerinde kullanılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Artırılmış veri setleri ile eğitilen DenseNet201 modeli, monkeypox'u tanıma konusunda önemli başarılar elde etti ve sırasıyla MSID ve HYBRID veri setlerinde %99.33 ve %98.52 doğruluk oranlarına ulaştı.

Anahtar kelimeler: Maymun çiçeği hastalığı, Virüs, Derin öğrenme, DenseNet201

activities and migration have led to the death of millions of people [3]. In recent years, we are facing new epidemics worldwide, such as COVID-19 and Monkeypox. COVID-19 is a disease that affects the respiratory tract and has become more dangerous than other epidemics [4]. Monkeypox is a viral zoonotic disease that causes a rash similar to smallpox, but with a lower spread rate and mortality [5]. Both diseases cause serious health problems. Monkeypox is a disease caused by the monkeypox virus and is related to smallpox.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: kemaladem@cumhuriyet.edu.tr (K. Adem)
Geliş / Recieved: 14.02.2024 Kabul / Accepted: 12.08.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1436907

The virus is usually transmitted through contact with infected animals, but humans and monkeys can also be incidental hosts. Monkeypox virus can be transmitted through contact with skin and mucous membrane lesion fluid, animal saliva, biting/scratching, contact with urine or feces, or animal bites. The potential for human-to-human transmission is low, but cases have been reported in non-endemic countries due to factors such as direct contact with infected lesions during sexual contact. Monkeypox can also be transmitted by droplet transmission, especially during face-to-face contact at close quarters without personal protective equipment. The risk of transmission increases with increasing exposure at a distance of less than 2 meters for at least 3 hours. Monkeypox virus has been assessed as a disease with epidemic potential. Measures have been taken around the world to contain the outbreak. The World Health Organization declared many African countries as endemic areas and declared a global public health emergency [6]. Technology played an important role in improving transportation and communication channels during the pandemic. Technological developments are of great importance in planning health services and controlling the epidemic. Advances in medicine and technology are reducing the impact of epidemics and controlling their spread. Technological advances such as deep learning methods have been used in areas such as image classification and object detection. Conventional methods for detecting monkeypox require contact. This study uses machine learning and deep learning methods and will contribute to the literature by detecting the disease without requiring physical contact. Detection of the disease without physical contact will reduce the spread rate. It is hoped that these advances will continue in the future to develop more effective outbreak prevention and treatment strategies. [7-12].

2 Literature review

Nowadays, the field of deep learning has gained great importance and various studies have been carried out in this field. The analysis and evaluation of these studies will allow us to understand the current state of knowledge and benefit from the results described in this field. In this section, we present an overview of previous research on the detection of monkeypox using deep learning methods. While reviewing the related literature, we aimed to find results obtained in similar studies using image processing to guide our work.

Chiranjibi and Tej obtained Precision: 85.44%; Recall: 85.47%; F1-score: 85.40%; and Accuracy: 87.13% in their study on monkeypox images using 13 different pre-trained deep learning models: 85.40%; and Accuracy: 87.13%. He also stated that his study was conducted on limited data and that the performance will be further improved by increasing the dataset.

Shams et al. used ResNet50, VGG16 and InceptionV3 models in their study on a dataset consisting of 1428 and 1764 images after enlargement with 3 different trained models in the "Monkeypox Skin Lesion Dataset (MSLD)" consisting of 102 monkeypox skin lesions and 126 other datasets, and the highest reliability rate was obtained with ResNet50 (82.96±4.57%). With the mobile application

developed with deep learning support, it has been revealed that it may have the potential to detect monkeypox disease.

Sahin et al. trained the data classified as positive and negative using TensorFlow. The mobile application now incorporates the TensorFlow Lite model alongside its library for detecting monkeypox. This integrated system allows individuals with bodily lesions to promptly conduct an initial diagnosis. Consequently, those potentially afflicted with monkeypox are prompted to seek specialist attention promptly for confirmation. Test outcomes indicate that the system achieved a classification accuracy of 91.11% for images.

Md et al. Since there is no publicly available Monkeypox dataset for ML model development, the study presents a new dataset named "Monkeypox2022" with images obtained from many open source and online platforms without any restrictions, including commercial purposes. The study proposes a modified VGG16 model that includes two separate studies, the first study and the second study. Exploratory calculations show that the proposed model can detect Monkeypox patients with high accuracy rates. The accuracy rate for Study 1 was $97 \pm 1.8\%$ (AUC = 97.2) and for Study 2 was $88 \pm 0.8\%$ (AUC = 0.867). Furthermore, when explaining the model's predictions and feature extraction, he used Local Explainable Model-Independent Explanations (LIME) to provide deeper insight into the specific features that characterize the onset of Monkeypox virus. In this study, he demonstrated the potential of an ML-based approach for the diagnosis of Monkeypox disease and emphasized the need for further research and the creation of datasets.

Md et al. aimed to integrate deep transfer learning approaches with a convolutional block attention module (CBAM) for the image-based classification of human monkeypox. They utilized five deep learning models, namely VGG19, Xception, DenseNet121, EfficientNetB3, and MobileNetV2, incorporating attention mechanisms focused on both channels and spatial dimensions. A comparative analysis was performed across these models. The Xception-CBAM-Dense architecture stood out, surpassing the others in accurately classifying human monkeypox and related conditions, achieving a validation accuracy of 83.89%.

Altun et al. evaluated the performance of several deep learning models—including MobileNetV3-s, EfficientNetV2, ResNet50, VGG19, DenseNet121, and Xception—using metrics such as AUC, accuracy, sensitivity, loss, and F1-score for comparison. The optimized hybrid MobileNetV3-s model stood out by delivering the best results, with an average F1-score of 0.98, an AUC of 0.99, an accuracy of 0.96, and a sensitivity of 0.97. Their research involved using convolutional neural networks along with hyperparameter optimization and a custom hybrid function transfer learning approach to develop a specialized CNN model, which achieved impressive performance.

In his research titled "A vision transformer-based approach for automatic COVID-19 diagnosis from chest X-ray images," Pacal introduced a diagnostic framework leveraging the transformer method, which represents the

latest and notably more popular deep learning architecture compared to previous techniques like CNN-based approaches. This system incorporates vision transformer models to enhance the diagnosis of COVID-19 on a novel dataset, COVID-QU-Ex. Through experimental analysis, Pacal noted the superior performance of vision transformer models over CNN models. Specifically, the ViT-L16 model exhibited a test accuracy and F1-score exceeding 96%, showcasing significantly enhanced performance compared to similar studies documented in existing literature.

Akyel, in his study titled Diagnosis of oral cancer from histopathologic images with Xception, used the Xception model pre-trained and modified with the sequential algorithm unlike the existing literature. In the training phase with two classes of normal and oral squamous cell cancers, he achieved 98.70% training success, 97.20% membrane accuracy, 96.50% precision and 97% sensitivity respectively. These values were compared with some other studies in the literature. In his study, it was seen that the Xception model together with Clahe is a suitable option in oral cancer classification and can be useful in the diagnosis process.

Diker presents the performance comparison of deep learning techniques in cerebral palsy classification in his study titled Automatic classification of cerebral palsy using deep learning methods. The performance of different deep learning algorithms such as EfficientNetB0, MobileNet-V2, ResNet18 and VGG-16 are compared respectively. EfficientNetB0, MobileNet-V2, ResNet18 and VGG-16 obtained 84.6%, 87.4%, 80.9% and 92.6% accuracy values for deep learning models respectively.

Çeçen and Özer, in their study titled Classification of pathological breast cancer images with YOLOv5 algorithm, pathological images of biopsies taken from breast tissue were analyzed with deep learning method, a sub-branch of artificial intelligence. Classification of breast cancer type was studied. YOLOv5 algorithm was used as a deep learning model. As a result of the experiments, tumor classification was achieved with a high success rate of 95.3% in the accuracy parameter.

In Tüfekçi and Gezici's study titled "Detection of COVID-19 and viral pneumonia from chest x-ray images with deep learning," the aim was to establish a highly accurate and dependable model capable of discerning between COVID-19 and viral pneumonia based on chest x-ray images. The research involved a comprehensive modeling endeavor, employing both the original and transfer learning-enhanced versions of AlexNet and GoogleNet, specialized architectures of Convolutional Neural Networks, renowned in deep learning. The dataset utilized in the modeling process, the COVID-19 Radiography Database, is a widely used yet imbalanced dataset featuring three classes with varying sample sizes. To address this, data reduction and augmentation techniques were employed, resulting in the creation of two balanced datasets with an equal number of samples in each class. The original dataset and the newly balanced datasets were partitioned into training and test sets in an 80-20 ratio and further divided into subsets for 3, 5, and 10-fold cross-validation. Model performances were

evaluated, and the model with the highest performance was identified. Ultimately, the most effective model was determined to be the one employing the AlexNet architecture with transfer learning on the augmented dataset, segmented into 10-fold cross-validation, achieving an accuracy of 99.90%.

According to Inik and Ulker, the extraction of feature vectors is of great importance in building machine learning systems. However, this process is time-consuming as it usually requires the intervention of experts in the field and they cannot process the raw data directly. Unlike classical machine learning techniques, deep learning solves this problem by learning on raw data. Deep networks obtain the necessary information by creating representations in different layers.

Deep learning has attracted attention with its success in object classification, especially in ImageNet, a large-scale visual recognition competition organized in 2012. The reason behind this success lies in the availability of sufficient data for training and the hardware infrastructure to process this data. Convolutional Neural Network (DNN) architecture includes convolution, pooling, ReLU, DropOut, fully connected and classification layers. These architectures constitute the basic building blocks of deep learning. In addition, deep learning architectures such as AlexNet, ZFNet, GoogLeNet, Microsoft ResNet and RCNN have also played an important role in the development of deep learning.

Kumar et al. discussed the limitations of RT-PCR tests commonly used for Covid-19 diagnosis, highlighting their propensity for false positive and false negative results and noting the lengthy process involved. To improve accuracy, they suggested increasing the number of simultaneous tests. Additionally, they pointed out that CT scans and X-rays could detect Covid-19-related pneumonia early on. By applying advanced deep learning techniques, they achieved over 95% accuracy in diagnosing Covid-19. The team employed eight deep learning models based on convolutional neural networks (CNN), including ResNet 152 v2, InceptionResNet v2, Xception, Inception v3, ResNet 50, NASNetLarge, DenseNet 201, and VGG 16, to detect pneumonia in both X-ray and CT scan images. Comparative analysis indicated that these models effectively differentiate Covid-19 positive cases.

On a related note, Ahmet et al. described oral cancer as a serious disease, ranking as the seventh most common cancer globally. Histopathologic examination is the current gold standard for diagnosing oral cancer, especially in the head and neck regions. However, this method is time-consuming and demands expert analysis. Timely identification of Oral Squamous Cell Carcinoma (OSCC) is vital for successful treatment, reducing mortality and morbidity rates, and enhancing patient survival prospects. To aid clinicians, artificial intelligence techniques are being explored to reduce the workload on pathologists significantly. Ahmad et al. developed hybrid methods combining different features to enhance early OSCC diagnosis. Their research employed three different strategies, each using five unique models. The first strategy implemented transfer learning with models

such as Xception, Inceptionv3, InceptionResNetV2, NASNetLarge, and DenseNet201. The second strategy combined feature extraction from pre-trained CNN models with Support Vector Machines (SVM) for classification. Features extracted from models like Xception, Inceptionv3, InceptionResNetV2, NASNetLarge, and DenseNet201 were processed through the SVM algorithm for classification accuracy evaluation. The third strategy employed a hybrid feature fusion technique, combining deep features from the previously mentioned models. These features were reduced in dimensionality using principal component analysis (PCA) and merged with shape, color, and texture features obtained through the gray level co-occurrence matrix (GLCM), Histogram of Oriented Gradient (HOG), and Local Binary Pattern (LBP) methods. This hybrid feature fusion was integrated into an SVM model to improve classification accuracy. The proposed system showed impressive results for the rapid diagnosis of OSCC using histological images, with the SVM based on hybrid feature fusion achieving 97.00% accuracy, 96.77% precision, 90.90% sensitivity, 98.92% specificity, a 93.74% F-1 score, and an AUC of 96.80%.

3 Material and method

The database of our research consists of two parts. In the first part, the Monkeypox Skin Image Dataset (MSID) dataset was used on the Kaggle site. In the second part, the HYBRID dataset, which consists of Monkeypox Skin Image Dataset (MSID) on Kaggle, Monkeypox Master (MM) on GitHub and Monkeypox Original Images (MOI) on Kaggle, was used. After all images were collated, similar images were identified and extracted with the Visipics application. The datasets were preprocessed by inverting the colors and converting them to brown and gray scale, and data augmentation was performed in the same way in both datasets. In addition, random rotation (rotation_range), random zooming (zoom_range), random horizontal shift (width_shift_range), random vertical shift (height_shift_range), random vertical shift (height_shift_range), random horizontal shift (shear_range), random horizontal symmetry (horizontal_flip) and fill_mode preprocessing were applied to all datasets.

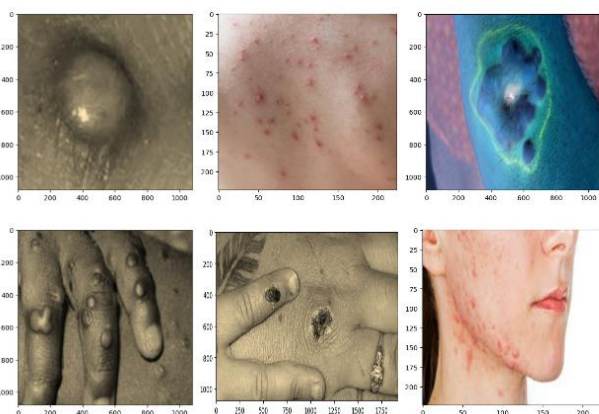


Figure 1. Examples of datasets with Monkeypox-MSID

As a result, the MSID cluster consists of 281 original images diagnosed with monkeypox, 278 color inverted images, 278 brown-scale images and 278 gray-scale images. The non-monkeypox images in the MSID set consist of 247 original images, 245 color inverted images, 245 brown scale images and 245 gray scale images. Data samples for this dataset are shown in Figure 1.

The HYBRID dataset consists of 389 original images with monkeypox diagnosis, 389 color inverted, 389 brown-scaled and 389 gray-scaled images. The non-monkeypox images in the HYBRID cluster consist of 677 original images, 677 color inverted, 677 brown-scaled and 677 gray-scaled images. Data samples of this dataset are shown in Figure 2.

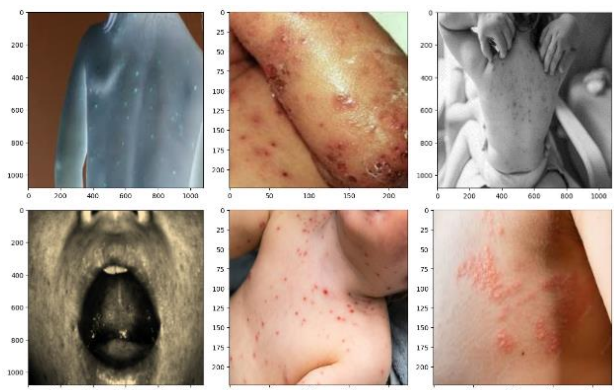


Figure 2. Examples of datasets with Monkeypox-HYBRID

While these datasets were divided into training and test files, 70% of training and 30% of test images were randomly generated with the code generated in Python. The data set distribution is shown in Table 1.

Table 1. Number of images in datasets

		Train	Test
Image of	MSID	1496	601
Number	HYBRID	2984	1280

There are many models commonly used in deep learning methods. In this study, DenseNet201, InceptionResNetV2, InceptionV3, NASNetLarge and Xception models, which are widely used in Convolutional Neural Networks, are used. The important advantage of these models is that they have improved information flow, parameter efficiency and the highest accuracy rates. In this respect, DenseNet201, InceptionResNetV2, InceptionV3, NASNetLarge and Xception models were preferred in this study.

3.1 Convolutional neural networks (CNN)

In 1998, Bottou, LeCun, Haffner, and Bengio introduced the LeNet model, one of the pioneering examples of convolutional neural networks. The LeNet model, which was initially used only to identify postal codes and numbers, has now become a model that calculates billions of parameters, extracts meaning from data and finds solutions to various problems [13]. Convolutional neural networks have made

significant progress in computer vision, image-based applications and other fields. It has been observed that it has brought great success to many different fields such as face recognition, object identification, image categorization, autonomous construction, and disease detection [13, 14]. Convolutional neural networks (CNNs or ConvNets) are deep learning models designed to process input images and identify various objects within them [15]. CNNs share similarities with the architecture of artificial neural networks, featuring a multilayer structure. They comprise a convolutional layer, a pooling layer, and a fully connected layer. The convolutional and pooling layers are responsible for extracting features from the input image, while the fully connected layer forwards these features to the output layer for classification [16]. Figure 3 visually shows the structure of these layers. The fully connected layer prepares the classification process by connecting the neurons in the first layer to the neurons in the next layer [12]. [18].

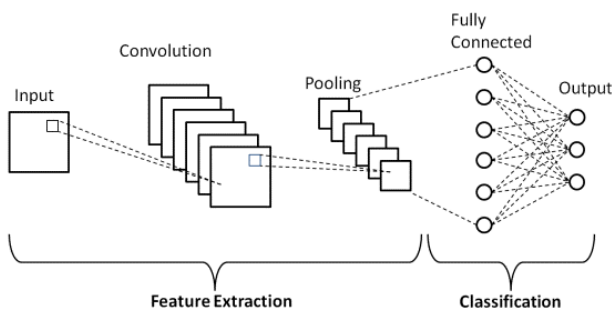


Figure 3. Basic structure of a Convolutional Neural Network

3.1.1 Convolution layer

It includes components called filters and feature maps, which determine the basic architecture of CNN and where a large computational process takes place [13]. Filters in this layer are used to detect features on the input image and play an important role in the creation of feature maps [19]. In this layer, the transformation process is performed using filters that are smaller in size than the input image. Filters are usually 2x2, 3x3 or 5x5 in size and perform a shift operation on the entire image [15]. These operations result in feature maps, which summarize the important information in the input image [16]. Figure 4 shows the output image obtained by applying a 3x3 convolution filter to a 5x5 matrix image given as input. This filter is applied by shifting over the image and this process is performed over the entire image [20].

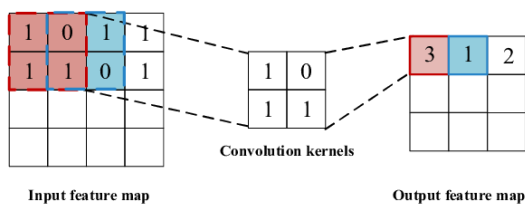


Figure 4. Image Convolution and output generation Process

3.1.2 Pooling Layer

The pooling layer is a layer that may not be used in some models because its use is not mandatory. In the pooling layer, computations are performed quickly and feature attributes from the previous layer are grouped to create new feature maps [19]. This layer aims to reduce the size for the next layer without loss of features. However, the reduction in the process may result in information loss. Although information loss may seem disadvantageous, it mainly helps to avoid overcompliance learning by reducing the computational load for the next layers [15]. Therefore, information loss is a feature which can be turned into an advantage of the system.

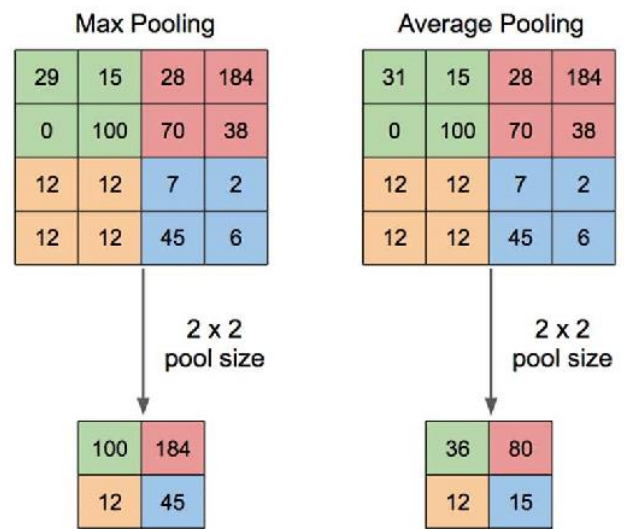


Figure 5. Maximum and average values of Pooling Layers [35]

The pooling layer is divided into two different structures, the maximum pooling layer and the average pooling layer, which are shown in Figure 5. Maximum pooling is a widely preferred method as it generally performs better. In this layer, the highest value of the pixels in the region scanned by the filters is selected as the output [13]. On the other hand, in the average pooling method, the average of the values in the selected region during the scanning process is determined as the output and the same process is applied to the other cells in the new array [19].

3.1.3 Activation functions

The choice of activation function depends on the neural network model used and the problem to be solved. Each activation function has different advantages and properties. Here are the preferred activation functions for some situations:

The sigmoid function is commonly used in the output layer of neural networks. It is especially preferred for binary classification problems. The sigmoid function allows us to interpret the output as a probability value between 0 and 1.

The Tanh function is similar to the sigmoid function but limits the output between -1 and 1. Common uses are binary classification problems where outputs with a range of -1 to 1

are needed, or when symmetric activation functions are required.

ReLU (Rectified Linear Unit) is an activation function commonly used in deep learning models. It has advantages such as fast computation and the ability of the model to learn faster. However, the fact that the ReLU function takes negative input values as zero can cause over-activation problems in some cases.

Leaky ReLU is an extension of the ReLU function. It preserves negative values by leaking on negative input values. This can help alleviate the over-activation problem.

The softmax function is used in multi-class classification problems. It allows us to compare the probabilities between classes by converting values from multiple outputs into a probability distribution.

Choosing an activation function depends on the dataset characteristics, the problem type, and the model's performance. You can choose the most appropriate activation function by conducting experiments and optimizing your model [21].

Deep learning models use components such as layers, optimization algorithms and loss functions along with activation functions to generate output based on input data. ReLU is a nonlinear activation function that is widely used in the literature [22]. ReLU is a function that performs well in problems where linearity is not required in the learning process [23]. The ReLU function is mathematically defined in Equation 1 [17].

$$f(x) = \max(0, x) \quad (1)$$

Here x represents the input value and the output of the function takes the value x if it is greater than 0 and 0 if it is less than 0.

ReLU (Rectified Linear Unit) is the preferred activation function in neural networks and has several advantages:

Fast Computation: ReLU is computationally faster compared to other activation functions such as sigmoid or tanh. This provides a significant advantage in computationally intensive applications such as large data sets or deep neural networks.

Linearity: ReLU exhibits a linear relationship for positive input values. Being a linear function gives the model better learning ability and makes it easier to update the weights.

No Decay Problem: The ReLU function produces a linear output for positive input values and zero output for negative input values. This ensures the correct transmission of the gradient during the training of the network and avoids the vanishing gradient problem.

Sparse Activation: ReLU assigns negative input values as zero. Therefore, a neural cell usually triggers only a few activations. This makes the network work in a more organized and less dependent way and reduces the risk of overfitting.

However, the fact that it outputs completely zero for negative input values can lead to a dead neuron problem in some cases [24]. In this case, modifications such as Leaky ReLU can be used. Since ReLU is a widely preferred

activation function in deep learning models due to these advantages, we preferred this function in our study.

3.1.4 Optimization method

Optimization is the process of optimally minimizing or maximizing a cost or loss function under certain constraints and parameters. In deep learning applications, it is known that there is an optimization problem underlying the learning process. In solving this problem, various optimization methods are used to discover nonlinear relationships and determine the optimal value. Various optimization algorithms can affect performance and speed in deep learning models. Among these algorithms, algorithms such as stochastic gradient descent, adadelata, adagrad, adamax, adam are frequently preferred [25]. These algorithms aim to minimize the loss function of the model using different optimization strategies and update rules. In this study, the Adam optimization algorithm is preferred due to its recent popularity and effectiveness in deep learning applications. Adam performs gradient-based optimization using adaptive moment estimation. This algorithm is known for its ability to quickly approach the minimum of the loss function and its adaptive properties in parameter updates. Using the Adam optimization algorithm is an effective choice for enhancing model performance and accelerating the learning process.

3.1.5 Fully connected layer

In deep learning models, particularly convolutional neural networks (CNNs), it is common practice to convert multidimensional data into one-dimensional sequences. This process is called "flattening" and is usually performed before the classification layer. Figure 6 shows an example of the flattening process. On the left side of Figure 6, a "Pooled Feature Map" is shown. This is a 3x3 matrix obtained after pooling in a CNN layer. The elements of this matrix are shown as 1, 1, 0 in the first row, 4, 2, 1 in the second row and 0, 2, 1 in the third row, respectively. The smoothing operation aims to transform the elements of this multidimensional matrix into a one-dimensional array. As shown in the figure, the elements of the matrix are taken in order (left to right and top to bottom) to form a one-dimensional array of 1, 1, 0, 4, 2, 2, 1, 0, 2, 1. This process is usually performed from row to row.

The smoothing process allows the multidimensional data generated by the intermediate layers of the CNN to be transferred to the fully connected layers. The fully connected layers perform the final classification process using this one-dimensional sequence. This process is critical in bringing the output of the network into a format suitable for classification. Thanks to the smoothing process, CNNs with multidimensional data structures can perform classification by transferring the obtained feature maps to fully connected layers. This process is a crucial step for deep learning models to function effectively, as illustrated in Figure 6, makes the input data suitable for the networks used.

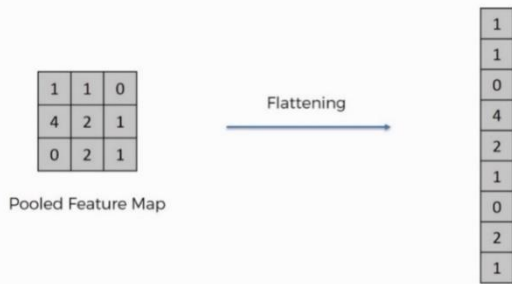


Figure 6. Data flattening in the fully connected layer for data transfer

3.2 DenseNet201 architecture

DenseNet201 is a deep learning model characterized by its neural network architecture with 201 layers of densely connected blocks. It is available as a pre-trained model for various tasks, including image classification, object detection, and segmentation. DenseNet201 is built on a convolutional neural network (CNN) architecture and is characterized by densely connected blocks. Densely connected blocks are designed to increase the depth of the network and provide better sharing of features. This architecture was developed by Huang et al. to enable knowledge transfer. For each layer, the outputs of the previous layers are used as input values. DenseNet is a network architecture that helps to significantly reduce the vanishing gradient problem. To achieve this, DenseNet has a reduced number of parameters [26]. DenseNet201 has a total of 201 layers consisting of an initial layer starting with a 7x7 convolution filter followed by a 3x3 MaxPool, 196 convolution layers with 3 average pool layers in between, and 1 output layer [27]. The DenseNet201 architecture is given an input of size $224 \times 224 \times 3$. In this model, each densely connected block is formed by combining the outputs of all layers in the previous block [28]. These dense connections facilitate the flow of information and allow the network to learn better features at deeper layers.

DenseNet201, trained on the ImageNet dataset, has demonstrated high performance in general image classification tasks. It is also adaptable for various applications through transfer learning methods. As a robust model in deep learning, DenseNet201 is frequently employed for complex and multi-class datasets. The architecture of the DenseNet201 model is illustrated in Figure 7.

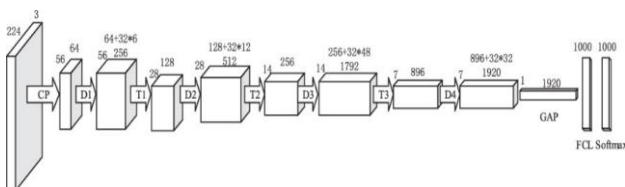


Figure 7. DenseNet201 architecture

3.3 NasNetLarge architecture

The NasNetLarge model was introduced by Zoph in the paper "Learning Transferable Architectures for Scalable Image Recognition". This work includes research on the

automatic design of a customized convolutional neural network (CNN) architecture using an artificial intelligence algorithm called Neural Architecture Search (NAS). The NasNetLarge model in Figure 8 is based on a network structure generated by the NASNet algorithm and optimized for large-scale image classification tasks. The model was developed by Google using the TensorFlow library. Furthermore, the paper describes in detail the dataset used during the training of the model and the training process. The NasNetLarge model is often used for image classification, object recognition and similar tasks using Transfer Learning. It can be fine-tuned for different datasets and tasks using pre-trained weights [29].

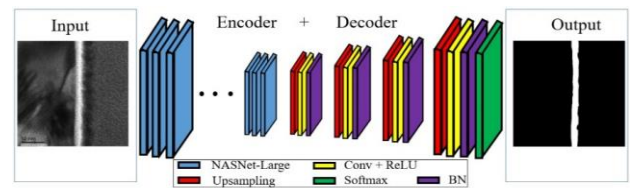


Figure 8. NasNetLarge architecture

3.4 InceptionV3 architecture

The Inception model is a CNN architecture that achieved high classification accuracy on the ImageNet dataset and won first place in the ILSVRC 2014 competition. This model has achieved notable success in image classification, significantly reducing the error rate compared to other competitors. In particular, it has a lower error rate than the VGG deep learning model introduced in 2014 [30]. The achievements with the Inception model have highlighted areas where accuracy can be improved and where model complexity needs to be reduced. In realizing these improvements, different versions of the Inception model have been developed and the InceptionV3 model is one of these versions. The InceptionV3 model builds on the original Inception model with the goal of further enhancing accuracy [31].

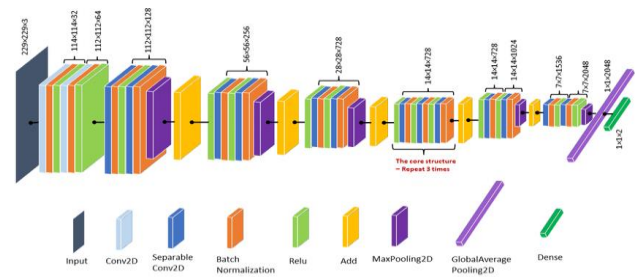


Figure 9. InceptionV3 architecture

The InceptionV3 model is a model that has a depth of 48 layers and uses inception modules that combine convolutions of dimensions 1x1, 3x3, 5x5. This model is known to be more efficient than VGGNet. The architecture of the InceptionV3 model is depicted in Figure 9. InceptionV3 uses two/three 3x3 filters for convolutions of size 5x5 or 7x7. This has been observed to increase the speed of the training

process as the number of parameters is reduced [30]. It is known that as the depth of the model increases, its width also increases. Therefore, in the InceptionV3 model, it is aimed to provide high information flow by optimizing the width and depth of the network [32]. As a result, the InceptionV3 model is a model with a depth of 48 layers and uses inception modules that combine convolutions of different sizes. In this model, the number of parameters is reduced by optimizing the size and number of filters in the convolutions and high information flow is achieved. In this way, the InceptionV3 model has a more efficient structure than VGGNet.

3.5 InceptionResNetV2 architecture

InceptionResNetV2 is a deep learning model developed by Google and was detailed in the 2016 article "Inception-v4, Inception-ResNet and the Impact of Residual Connections on Learning" by Christian Szegedy, Sergey Ioffe, Vincent Vanhoucke, and Alex Alemi [33]. This model combines the Inception architecture with residual connections. The Inception architecture aims to optimize the flow of information by using "inception" modules that combine convolutional operations at different scales. In this way, the model is more efficient to detect features at different scales. Furthermore, residual connections allow the model to learn deeper and more effectively. The InceptionResNetV2 model has a depth of 48 layers and uses inception modules with convolution operations in dimensions 1x1, 3x3, 5x5. These modules make it possible to detect various features by combining different filter sizes. In addition, having fewer parameters and preferring 3x3 filters increases the training speed and allows the model to learn more effectively. The InceptionResNetV2 model has a depth of 48 layers and uses inception modules with convolution operations in dimensions 1x1, 3x3, 5x5. These modules make it possible to detect various features by combining different filter sizes. In addition, having fewer parameters and preferring 3x3 filters increases the training speed and allows the model to learn more effectively. The InceptionResNetV2 model is frequently utilized in visual processing tasks, including image classification, object detection, and face recognition.

Especially when trained on large datasets such as ImageNet, this model achieves high success in detecting and classifying various image features. It can also be used in different visual processing problems with transfer learning methods to achieve impressive results. The InceptionResNetV2 model represents a significant advancement in deep learning and has demonstrated successful results across various application areas. The InceptionResNetV2 architecture model is shown in Figure 10.

3.6 Xception architecture

The Xception model is a deep learning architecture introduced by François Chollet in his 2017 paper, "Xception: Deep Learning with Depthwise Separable Convolutions.". Xception is a convolution-based neural network and is based on the Inception architecture. In the paper, depthwise separable convolutions, which is a different structure from the traditional convolution process, is used to increase the learning capacity and computational efficiency of the model. Unlike traditional convolutions, depthwise separable convolutions use a two-stage approach. In the first stage, convolution is performed on the input channels and then channel-level convolutions are processed separately. This structure reduces the number of parameters while preserving the network's learning ability and reducing the computational cost. The Xception model has achieved particularly effective results in image classification and visual processing tasks. Through the use of depth-structured convolutions, better learning performance is achieved while requiring fewer computational resources. The xception model is available in the Keras library as a module called "xception". Keras provides a tool that facilitates the use of this model and supports customization. The Xception model can be used in different image processing problems with transfer learning methods using pre-trained weights [34].

Xception has been a significant advance in the field of deep learning and has become an effective model thanks to the use of depth-structured convolutions. High classification accuracy and computational efficiency have made Xception popular in different application areas.

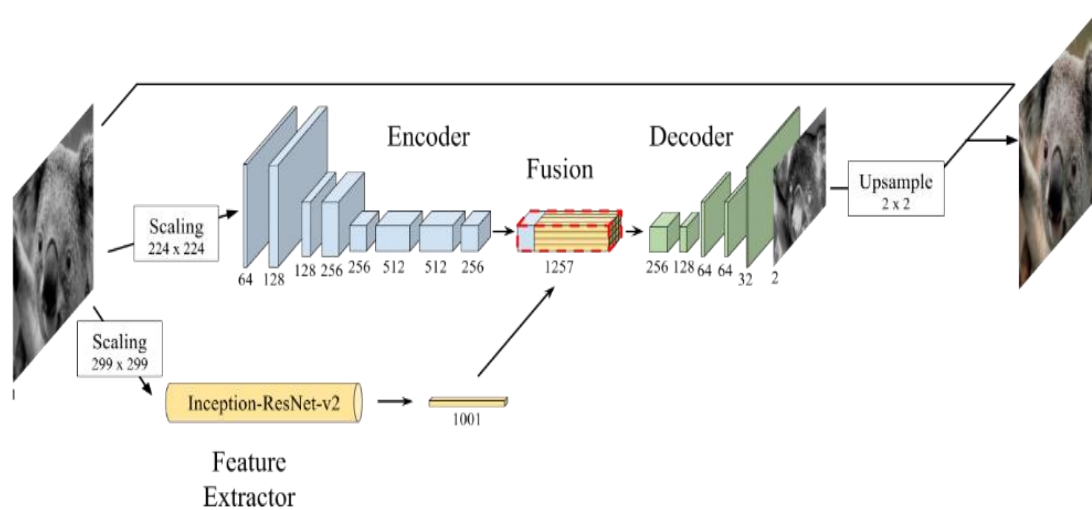


Figure 10. InceptionResNetV2 architecture

4 Findings and discussion

The proposed methods utilized the Google Colab Pro environment and GPU/TPU support and the Jupyter notebook due to the lack of an existing powerful machine.

Performance metrics were needed to test the success of the methods for monkeypox detection. Performance measures are metrics used to evaluate and compare the success rates of different proposed methods. In order to know these metrics, four basic parameters need to be known. These parameters are true positive (TP), true negative (TN), false positive (FP) and false negative (FN). The performance metrics calculated using these parameters, Accuracy Equation (2), Precision Equation (3), Recall Equation (4) and F-1 Score Equation (5) are presented below.

$$Accuracy = \frac{TN + TP}{TN + TP + FP + FN} \quad (2)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (4)$$

$$F1 - Score = 2 * \frac{Precision * Recall}{Precision + Recall} \quad (5)$$

The analysis in this part of our study utilizes five different deep learning models: DenseNet201, InceptionResNetV2, InceptionV3, NASNetLarge, and Xception. The results of two different datasets, MSID and HYBRID, are compared. The number of epochs was set to 10, the learning rate was 0.0001, and the batch size was 32.

Different deep learning models can perform better with various pooling sizes. For example, the DenseNet201 and NasNetLarge models achieve better results with a pooling size of 7x7, while the InceptionResNetV2 and InceptionV3 models prefer a pooling size of 5x5. The Xception model performs best with a 2x2 pooling size.

DenseNet201 and NasNetLarge: These models use a pooling size of 7x7 to capture features over a larger area.

This provides more information and improves classification accuracy [36].

InceptionResNetV2 and InceptionV3: These models prefer a 5x5 pooling size. 5x5 pooling helps to capture finer details in deeper layers of the model, which is especially important in more complex image data [37].

Xception: This model uses a 2x2 pooling size. 2x2 pooling allows the model to run faster and more efficiently by concentrating features in a smaller area. This helps the Xception model run faster and require less computation [37].

These different pooling sizes are optimized for the specific structure of the models and the targeted tasks. The pooling sizes are chosen according to the architecture of each model to achieve the highest performance. The aim of our study is to achieve the highest accuracy in detecting monkeypox across two different datasets using deep learning methods, to analyze the differences between the results, and to uncover significant findings.

The graphs showing the change in the success rate according to the training and test data are given below. When the graphs are examined, the changes of the models as a result of the analysis in MSID and HYBRID datasets are observed in DenseNet201 Figure 11, InceptionResNetV2 Figure 12, InceptionV3 Figure 13, Xception Figure 14 and NasNetLarge Figure 15.

When the graphs are analyzed, the training and test data of MSID and HYBRID datasets in all models fluctuate during training, but the most successful results are seen in the MSID dataset. The aim of our study is to obtain the maximum accuracy value of monkeypox disease in two different datasets with deep learning methods, to examine the differences between the values and to reveal important findings. As a result of the studies, the accuracy, precision recall F1-Score, loss values and times of all models are comparatively given in Table 2. The aim of our study is to achieve the highest accuracy in detecting monkeypox across two different datasets using deep learning methods, to analyze the differences between the results, and to reveal significant findings. The accuracy, precision, recall, F1-Score, loss values, and processing times for all models are comparatively presented in Table 2.

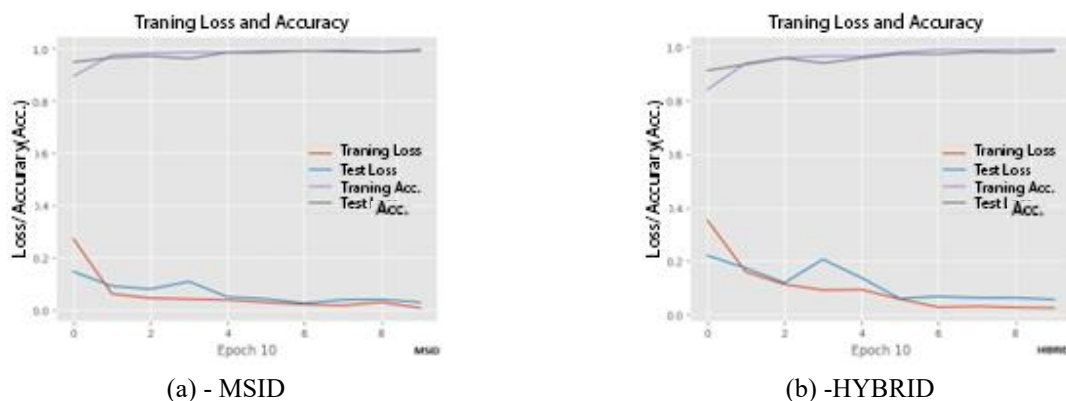


Figure 11. Progress graph of DenseNet201 model on training (a) and (b) datasets

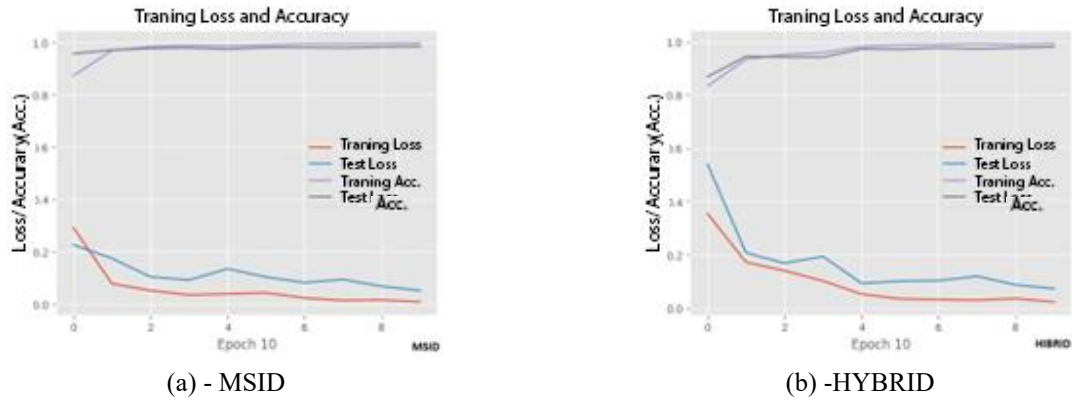


Figure 12. Progress graph of InceptionResNetV2 model on training (a) and (b) datasets

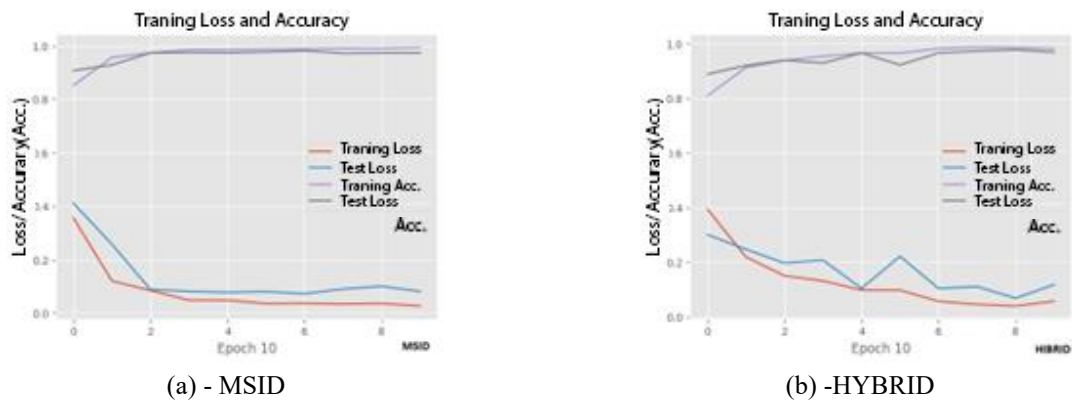


Figure 13. Progress graph of InceptionV3 Model on training (a) and (b) datasets

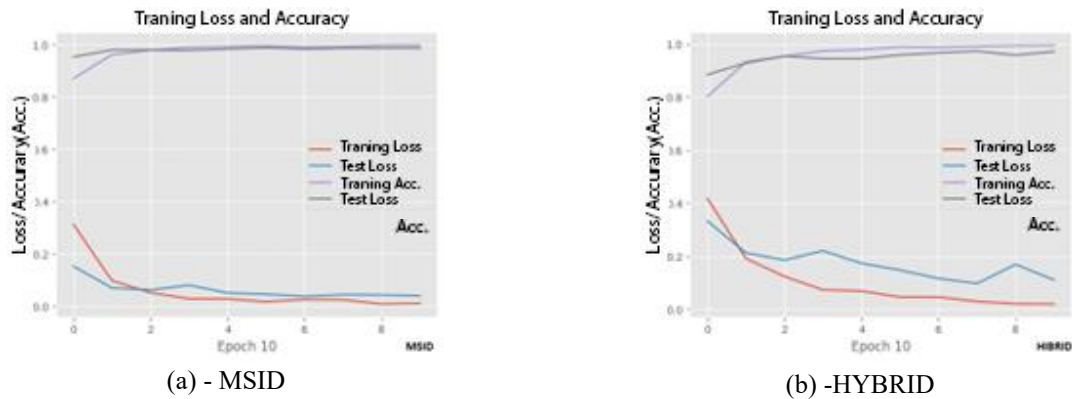


Figure 14. Progress graph of Xception Model on training (a) and (b) datasets

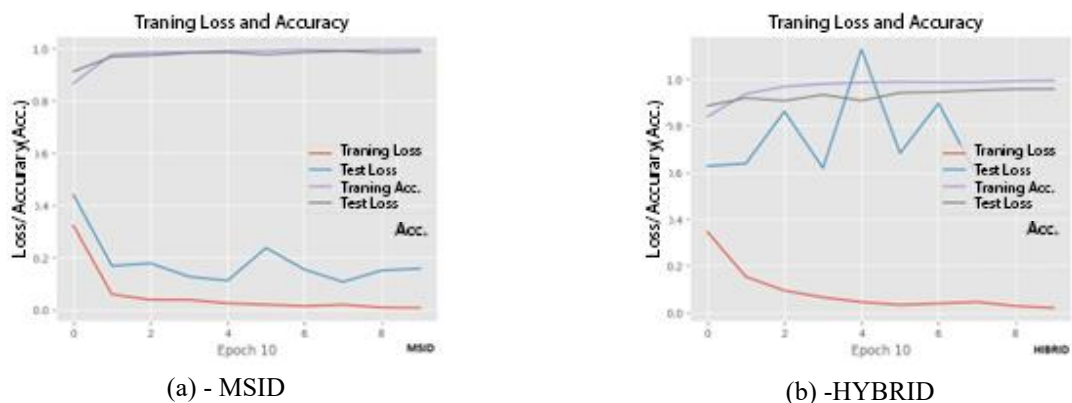


Figure 15. Progress graph of NasNetLarge Model on training (a) and (b) datasets

Table 2. Test performance evaluation of models

Dataset	Model	Accuracy	Loss	Precision	Recall	F-1 Score	Time
MSID	DenseNet201	0.9933	0.0302	0.99	0.99	0.99	3 h 21 min 21.99 sec
	NasNetLarge	0.9883	0.1579	0.99	0.99	0.99	5 h 33 min 9.44 sec
	Xception	0.9866	0.0404	0.99	0.99	0.99	2 h 10 min 8.79 sec
	InceptionResNetV2	0.9850	0.0531	0.99	0.99	0.99	5 h 13 min 45.6 sec
	InceptionV3	0.9733	0.0815	0.97	0.97	0.97	2 h 29 min 24.16 sec
HYBRID	DenseNet201	0.9851	0.0573	0.99	0.99	0.99	1 h 18 min 56.93 sec
	InceptionResNetV2	0.9812	0.0724	0.98	0.98	0.98	50 min 27.32 sec
	Xception	0.9703	0.1097	0.99	0.99	0.99	55 min 23.87 sec
	InceptionV3	0.9679	0.1167	0.99	0.99	0.99	25 min 25.38 sec
	NasNetLarge	0.9578	0.7200				2 h 3 min 51.28 sec

In line with the evaluations made on the MSID dataset in Table 2, the accuracy rates of the models used are analyzed. The highest accuracy rate was achieved with the DenseNet201 model at 99.33%, whereas the InceptionV3 model recorded the lowest accuracy rate at 97.33%. The accuracy rates of the other models are as follows: 98.50% for InceptionResNetV2, 98.83% for NASNetLarge, and 98.66% for Xception. Looking at the accuracy rates, it is seen that the DenseNet201 model is more successful than the other models. In this case, the ranking of the models according to accuracy rates is as follows: DenseNet201, NasNetLarge, Xception, InceptionResNetV2 and InceptionV3.

In line with the evaluations made on the HYBRID dataset in Table 2, the models used were analyzed according to their accuracy rates. The highest accuracy rate is obtained with the DenseNet201 model with 98.51%, while the lowest accuracy rate belongs to the NasNetLarge model with 95.78%. The accuracy rates of the other models are 98.12% (InceptionResNetV2), 96.79% (InceptionV3) and 97.03% (Xception), respectively. Looking at the accuracy rates, it is seen that the DenseNet201 model is more successful than the other models. In this case, the ranking of the models according to accuracy rates is as follows: DenseNet201, InceptionResNetV2, Xception, InceptionV3 and NasNetLarge.

According to the analysis performed on the MSID dataset shown in Table 2, the recall, precision, loss and f1-score values of the models used were evaluated. The recall, precision and f1-score values of DenseNet201, InceptionResNetV2, NasNetLarge and Xception models were found to be 99% equal and higher than InceptionV3. In the InceptionV3 model, the recall, f1-score and precision values were 97%. When the models are compared, the lowest loss is 0.0302 in DenseNet201 and the highest is 0.1579 in NasNetLarge.

According to the analysis on the HYBRID dataset in Table 2, the recall, loss, f1-score and precision values of the models used were evaluated. The f1-score, precision and recall values of the DenseNet201 model were observed to be 99%. It was found to be higher than InceptionV3, InceptionResNetV2, Xception and NasNetLarge models. The precision, recall and f1-score values of the InceptionResNetV2 model were 98%. In the InceptionV3

and Xception models, the precision, recall and f1-score values were equal at 97%. A decrease in training loss and an increase in training accuracy indicate that the model fits the training data well and that the learning process is effective. Fluctuations in test loss and accuracy indicate that there may be some problems in the generalization ability of the model. In addition, parallel processing capabilities (such as GPU or TPU) negatively affected the training process of the model and f1-score, recall and precision values could not be calculated for the NasNetLarge Model.

More epochs or different regularization techniques can be tried for more stable performance of the model on test data and to reduce fluctuations. Also, parallel processing capabilities (such as GPU or TPU) can speed up the training process of the model and process larger data sets in less time.

5 Conclusions

In this study, maximum accuracy values were obtained with different deep learning models on the detection of monkeypox, one of the epidemic diseases, on two different datasets. Skin lesion images with and without monkeypox disease were classified using different deep learning models. As a result of the study, the DenseNet201 model demonstrated significant success in identifying monkeypox, achieving accuracy rates of 99.33% on the MSID dataset and 98.52% on the HYBRID dataset.

This study offers an important step forward in facilitating the detection of monkeypox disease by integrating technology. In particular, the high accuracy rates achieved by DenseNet201 trained with deep learning models encourage the use of medical imaging systems in monkeypox diagnosis. This technology could help in the early diagnosis and treatment of patients in clinical settings. Moreover, innovative solutions such as mobile applications or remote diagnostic systems can also be effective in containing the spread of disease by providing access to remote areas. In the future, integrating such deep learning models into real-time diagnostic systems and making them widely available could be an important tool in the hands of healthcare professionals and public health experts. With the advancement of technology and the improvement of datasets, it is promising to develop more efficient and

reliable methods for early detection of epidemics such as monkeypox.

This study has some limitations. First of all, the limited datasets used and especially the limited representation of monkeypox cases from the general population creates uncertainty about how the model will perform in real-world conditions. Furthermore, the difficulties in collecting and labeling the datasets make it difficult to obtain widely usable and generally valid results.

However, it is critical that future studies utilize more comprehensive and rigorously prepared datasets. This will allow us to more accurately assess the real-world performance of deep learning models in diagnosing rare diseases such as monkeypox. Furthermore, the use of adequately equipped real-time systems is important to reliably integrate the models in clinical applications. In future researchs, it is also recommended to examine the performance of more advanced models, such as Vision Transformer (ViT), a next-generation architecture, on real data sets. Such innovative approaches can further advance the application of deep learning techniques in medical imaging.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): % 15

References

- [1] Tütüncü, D., & Esen, M. Salgın hastalıkların yönetiminde Nesnelerin İnterneti (NİT) kullanımı: COVID-19 örneği. Sağlık Akademisyenleri Dergisi, 8(2), 169-177, 2021.
- [2] B. Cerit, Gerçek zamanlı öğrenci takip sistemi ve derin öğrenme yaklaşımı ile maske tespiti. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Karabük, 2020.
- [3] Özer, İ. Türkiye Cumhuriyeti sınırlarını tehdit eden kolera saldırıları ve alınan savunma tedbirleri. Ordu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi, 10(1), 201-216, 2020.
- [4] Güngör, S., Kaya, M., & Alhadj, R. Renklendirilmiş BT görüntülerinden covid-19 tespiti için derin öğrenmeye dayalı bir yöntem. Computer Science, IDAP-2021: 5th International Artificial Intelligence and Data Processing symposium (Special), 391-399, 2021. <https://doi.org/10.53070/bbd.990750>.
- [5] Robert A. Weinstein, Aysegul Nalca, Anne W. Rimoin, Sina Bavari, Chris A. Whitehouse, reemergence of monkeypox: prevalence, diagnostics, and countermeasures, clinical infectious diseases, 41 (12), 1765–1771, 2005. <https://doi.org/10.1086/498155>.
- [6] World Health Organization. Multi-country monkeypox outbreak in non-endemic countries. <https://www.who.int/emergencies/disease-outbreak-news/item/2022-DON385>, Accessed 20 Haziran 2022.
- [7] K. Adem, Impact of activation functions and number of layers on detection of exudates using circular Hough transform and convolutional neural networks, Expert Systems with Applications, 203, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117583>.
- [8] Adem, K., Ozguven, M.M. & Altas, Z. A sugar beet leaf disease classification method based on image processing and deep learning. Multimed Tools Appl 82, 12577–12594, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11042-022-13925-6>.
- [9] M. Hekim, O. Cömert ve K. Adem, A hybrid model based on the convolutional neural network model and artificial bee colony or particle swarm optimization-based iterative thresholding for the detection of bruised apples. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences. 28(1), 61-79, 2020. <https://doi.org/10.3906/elk-1904-180>.
- [10] S. Kılıçarslan, K. Adem, and M. Çelik, An overview of the activation functions used in deep learning algorithms, JNRS, 10(3), 75-88, 2021. <https://doi.org/10.54187/jnrs.1011739>.
- [11] E. K. Yılmaz, K. Adem, S. Kılıçarslan, ve H. A. Aydın, Classification of lemon quality using hybrid model based on Stacked AutoEncoder and convolutional neural network. Eur Food Res Technol, 249, 1655–1667, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00217-023-04245-6>.
- [12] A. A. Yurdusev, K. Adem, ve M. Hekim, Detection and classification of microcalcifications in mammograms images using difference filter and Yolov4 deep learning model. Biomedical Signal Processing and Control, 80, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2022.104360>.
- [13] M. Akar, Covid-19'a karşı insansız hava aracı ile derin öğrenme tabanlı maske tespiti. Yüksek Lisans Tezi, Karamanoğlu Mehmet Bey Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi, Karaman, 2022.
- [14] S. V. Militante ve N. V. Dionisio, Deep learning implementation of facemask and physical distancing detection with alarm systems. 2020 Third International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering (ICVEE), 1-5, 2020.
- [15] B. Kaya, ve M. Önal, COVID-19 Tespiti için akciğer BT görüntülerinin bölütlenmesi. Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi (28), 1296-1303., 2021. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1015061>.
- [16] E. Özbay, ve Ö. Altunbey, Derin öğrenme ve sınıflandırma yaklaşımları ile BT görüntülerinden Covid-19 Tespiti. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 12 (2), 211-219, 2020. <https://doi.org/10.24012/dumf.812810>.
- [17] G. H. Christa ve K. M. Sagayam, CNN-based Mask Detection System Using OpenCV and MobileNetV2. 2021 3rd International Conference on Signal Processing and Communication (ICPSC), pp. 115-119, Coimbatore, India, 2021.
- [18] M. Shamrat, S. Chakraborty, Md. M. Billah, Md. A. Jubair, M. S. Islam ve R. Ranjan, Face mask detection using convolutional neural network (CNN) to reduce the spread of Covid-19. 2021 5th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI), pp. 1231-1237, Tirunelveli, India, 2021.

- [19] A. A. Jasim, Gerçek Zamanlı Yüz Maskesi Algılama Uyarı Sistemi. Yüksek Lisans Tezi, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalı, Kırşehir, 2022.
- [20] M. Türkoğlu, K. Hanbay, I. Saraç Sivrikaya, ve D. Hanbay, Derin Evrişimsel Sinir Ağı Kullanılarak Kayısı Hastalıklarının Sınıflandırılması. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9(1), 334-345, 2020. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.562101>.
- [21] K. He, X. Zhang, S. Ren, ve J. Sun, Delving deep into rectifiers: surpassing human-level performance on ImageNet Classification. 2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), pp. 1026-1034, Santiago, Chile, 2015.
- [22] Y. Alqadiri, Face mask detection using deep learning methods. Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 2022.
- [23] A. L. Maas, A. Y. Hannun, ve A. Y. Ng, Rectifier nonlinearities improve neural network acoustic models. Proceedings of the 30th International Conference on Machine Learning, 28 (3), Atlanta GA, USA, 2013.
- [24] I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville, ve Y. Bengio, Deep Learning (Adaptive Computation and Machine Learning series). MIT Press, 2016.
- [25] A. Atcılı, Yapay Sinir Ağlarında Kullanılan Optimizasyon Algoritmaları. Machine Learning Türkiye. <https://medium.com/machine-learning-t%C3%BCrkiye/yapay-sinir-a%C4%9Flar%C4%B1nda-kullan%C4%B1lan-optimizasyon-algoritmalar%C4%B1-3e87cd738cb5>, Accessed 30 Aralık 2022.
- [26] H. Çetiner, Yaprak hastalıklarının sınıflandırılabilmesi için önceden eğitilmiş ağ tabanlı derin ağ modeli. Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(15), 442-456, 2021. <https://doi.org/10.54365/adyumbd.988049>.
- [27] H. Bingöl, Classification of OME with eardrum otoendoscopic images using hybrid-based deep models, NCA, and Gaussian method. Traitement du Signal, 39(4), 1295-1302, 2022. <https://doi.org/10.18280/ts.390422>.
- [28] X. Yu, N. Zeng, S. Liu, ve Y. D. Zhang, Utilization of DenseNet201 for diagnosis of breast abnormality. Machine Vision and Applications 30, 1135–1144, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00138-019-01042-8>.
- [29] B. Zoph, V. Vasudevan, J. Shlens, ve Q. V. Le, Learning transferable architectures for scalable image recognition. 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 8697-8710, Salt Lake City, UT, USA, 2018.
- [30] F. Bozkurt, Derin öğrenme tekniklerini kullanarak akciğer X-Ray görüntülerinden COVID-19 tespiti. Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi, 24, 149-156, 2021. <https://doi.org/10.31590/ejosat.898385>.
- [31] M. M. A. Ashames, Derin öğrenme yöntemleri kullanılarak osteoporozun belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya, 2020.
- [32] C. Szegedy, W. Liu, Y. Jia, P. Sermanet, S. Reed, D. Anguelov, D. Erhan, V. Vanhoucke ve A. Rabinovich, Going deeper with convolutions. 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 1-9, Boston, MA, USA, 2015.
- [33] C. Szegedy, S. Ioffe, V. Vanhoucke, A. Alemi. Inception-v4, Inception-ResNet and the impact of residual connections on learning. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 31(1), Phoenix, Arizona, 2016.
- [34] Keras.io. (2022). Keras documentation: The Model class. <https://keras.io/api/models/model/>, Accessed 29 December 2022.
- [35] Ö. Doğan, CNN (Convolutional Neural Networks) Nedir?, <https://teknoloji.org/cnn-convolutional-neural-networks-nedir>, Accessed 28 December 2022
- [36] C. Szegedy, S. Ioffe, V. Vanhoucke, J. Shlens. Rethinking the inception architecture for computer vision. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, pp. 2818-2826, Las Vegas, NV, USA, 2016.
- [37] A. Dash, P. Sethy, Statistical analysis and comparison of deep convolutional neural network models for the identification and classification of maize leaf diseases. Multimedia Tools and Applications, 1-14, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11042-024-18481-9>.





Assessing the evolution of urban expansion density over a century, Konya, Türkiye

Kentsel yayılma yoğunluğunun yüzyıldaki gelişiminin değerlendirilmesi, Konya, Türkiye

Gülsüm Eloğlu¹ , Kadir Şahbaz² , Aslı Bozdağ^{3,*} 

^{1,2,3} Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

Abstract

The year 2023 represents a 100-year period of becoming a country for Türkiye. This study examines the urban expansion evolution of Konya in Turkey over a century of urbanization. The expansion process is assessed through the analysis of urban plans from 1923, 1945, 1967, 2000, and 2023 using (1) density calculation derived from the population divided by built-up cells and (2) density calculation utilizing Inverse S function based on land use data. Considering the calculated densities, the city's evolution over a hundred years is examined concerning evolving regulations land use decisions, and growth trajectories. The existing conditions, encompassing both the advantageous and disadvantageous facets of urban expansion, are examined using SWOT analysis, and spatial development strategies for the future are devised. As a result, it has been determined that Konya has undergone urban expansion in certain directions irregularly, attributed to transportation-focused planning decisions, deviating from human-scale and compact urban development.

Anahtar kelimeler: Urban expansion, Land density, Inverse S-shape Rule, GIS, SWOT

1 Introduction

Urbanization is a process that refers to the movement of the population from rural areas to urban areas and the development of the transportation system and residential areas with the increase in construction [1, 2]. The industrialization movement initiated by the fordist system in the agricultural sector after World War II reduced the need for labor in the agricultural sector [1, 3, 4]. Accordingly, due to the decreasing employment in the agricultural sector, the society, seeking new sectors, left the rural areas and migrated to the cities to provide new employment opportunities [4, 5]. Therefore, urbanization also refers to a process that transforms from agricultural societies to industrial societies.

In Türkiye, migration from rural to urban areas increased after 1950. The society started to create industrial areas for employment purposes and housing around them for sheltering and the first urban expansion movements started [2, 6, 7]. These first urban expansion movements emerged due to the urbanization process caused by the economic transformation triggered by industrialization. In this process,

Öz

2023 yılı Türkiye için 100 yıllık bir devlet olma sürecini ifade etmektedir. Bu çalışmada, Türkiye'nin Konya kentinin 100 yıllık bir kentleşme deneyiminde yayılma süreci analiz edilmiştir. Yayılma süreci 1923, 1945, 1967, 2000 ve 2023 yıllarına ait planlar kapsamında; (1) yerleşik hücrelere bölünen ve bu hücrelerde yaşayan kişi sayısına bağlı yoğunluk ve (2) arazi kullanım verilerine dayalı Ters S ile yoğunluk hesaplaması yöntemleri kullanılarak elde edilen yayılma ölçütleri üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen yoğunluk verileri kapsamında 100 yıllık süreçteki kent; değişen mevzuat, arazi kullanım kararları ve gelişme yönleri kapsamında tartışılmıştır. Kentsel yayılmanın olumlu ve olumsuz yönlerini içeren mevcut durum SWOT yardımıyla analiz edilerek gelecek için mekânsal gelişim politikaları oluşturulmuştur. Sonuç olarak, Konya kentinin ulaşımaya yönelik plan kararları nedeniyle homojen olmayan nitelikte belirli yönlerde kentsel yayılma ve sıçramalar gösterdiği ve insan ölçeğinden ve kompakt kentleşmeden uzaklaştığı tespit edilmiştir.

Keywords: Kentsel yayılma, Arazi yoğunluğu, Ters S Kuralı, CBS, GZFT

the city's orientation towards rural areas and fertile agricultural lands, the planning approach that enables the city to expand towards the rural-urban fringe with low housing density, dependence on private vehicles and the formation of decentralized communities are defined as urban expansion [8-14].

Since urban expansion is a result of population and economic growth, it has positive aspects such as the development of urban business sectors and infrastructure. However, it has many negative consequences, such as environmental problems, traffic congestion, water scarcity, economies of scale, car dependency, fragmented land use and loss of agricultural and natural land, which reduce urban livability and accelerate climatic changes [13-16]. The negative consequences of urban expansion endanger the sustainability system and livability level of cities [17-19]. In order to find solutions for the negative effects of urban expansion, it is necessary to measure the change of spatial and temporal expansion and to understand the causes of expansion [18, 20-22].

* Corresponding author, e-mail: aslibozdag@ohu.edu.tr (A. Bozdağ)

Geliş / Received: 07.04.2024 Kabul / Accepted: 12.08.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1466200

The variability of urban expansion across regions, its lack of a universal definition, and its relative nature have led to concerns regarding the measurement of expansion [18, 23-25]. However, many indicators and statistics have been developed in the literature to measure urban expansion [18, 20, 26-29]. Urban form must first be characterized in order to measure urban expansion. The metrics defining urban form have been analyzed in three categories: density, diversity, and spatial structure pattern [21, 30].

In the literature, there are many studies based on density, diversity and spatial structure pattern metrics that categorize urban form to measure urban expansion. Jiao [31] analyzed urban expansion based on land use change using an inverse S-shaped mathematical function. In Steurer and Bayr [21], urban expansion is analyzed by considering all three characteristic categories of urban expansion (low density, low continuity of land use type and low compactness of the city shape) and using multiple urban expansion indicators. Although urban expansion has been analyzed with different indicators, it has been stated in many studies that density analyses are the basic and most important indicator to define urban expansion [20, 31-33].

In this study, the change of urban expansion in Konya, Türkiye is analyzed by examining plans and planning decisions from the years 1923, 1945, 1965, 2000, and 2023. Two different density metrics that categorize urban form are used for measuring urban expansion. Firstly, the density change of urban expansion is calculated using the inverse S-shaped mathematical function of Jiao [31] based on land use intensity. Then urban expansion is calculated using the number of people divided by built-up cells in study district based on population [21]. The expansion pattern was analyzed by comparing the results of both density metrics by years. The urban expansion process is discussed within the scope of changing legislation, land use decisions and urban development directions in 100 years within the scope of density changing over the years. Then, the current situation, including the positive and negative aspects of urban expansion, is analyzed with the help of SWOT method and spatial development policies for the future are formed. Unlike the literature, the change of urban expansion is compared by analyzing the population and land use intensity together in a long period covering 100 years. This study provides important contributions to science in determining the areas expected to experience rapid urbanization in the future for Konya city, quantitatively characterizing and evaluating regional or global urban expansion in a century-long period.

2 Materials

Konya province is located between 36° 41' and 39° 16' north latitudes and 31° 14' and 34° 26' east longitudes with a surface area of 38.873 km² in the Central Anatolia region of Türkiye (Figure 1). The city of Konya, which was selected as the study area, is a settlement that has traces of the Roman city dating back to ancient times and has developed as the capital of the Seljuks civilization. Being a Seljuks capital was effective in the development of urbanization and trade.

The city, which shows sectoralization in agricultural production, is also an important religious tourism center.

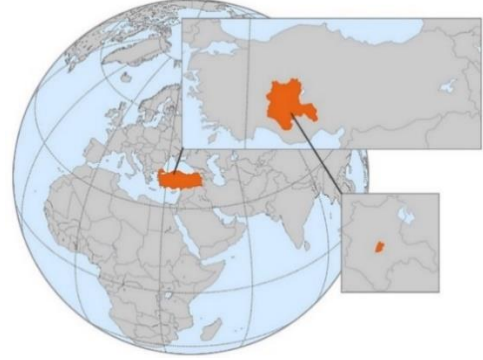


Figure 1. General view of Konya city

The studies in the literature supporting the existence of the spread regarding the urban expansion process in Konya city have been examined. Akseki and Meşhur [34] analyzed the expanding process in Konya city through different city plans after 1950 within the scope of fertile agricultural lands opened to construction. As a result, they determined that although the agricultural areas were tried to be protected with the zoning plans prepared after 1960, especially the 1st and 2nd class agricultural lands in the southern and western parts of the city were opened to construction due to the inadequacy of economic solutions and the plans were not successful. Karabacak [16] examined the urban expansion processes including Konya at the metropolitan scale and determined that urban expansion was intense in cities where the establishments were old and the population size increased. In the study conducted by Öncel and Meşhur [35] on the causes of urban expansion in Konya, it was determined that liberal policies and the increase in public and private sector capital investments in Turkey after 1980 caused expansion specific to Konya in planning control. These studies conducted for the city of Konya provide important evidence that urban expansion is directly related to population growth and capital growth based on planning studies

2.1 Dataset

In order to analyze the change in urban expansion in Konya city center between 1923-2023, maps and inventories for the past years were collected from institutions. The ways of obtaining the collected maps, their characteristics and the spatial analyses performed are summarized in Table 1 by years.

The problem encountered in all the maps obtained is the lack of a common georeference system. In order to solve this problem and to ensure that the maps overlap, the land use patterns that have survived in the city from 1923 to 2023 and have not changed have been investigated (Figure 2). First of all, the historical urban fabric was examined and some landmarks (cemetery, mosque, monuments, etc.) that still exist on the city were identified.

By using these landmarks in both physical and digital maps, common georeferencing was performed and digital format of all maps was obtained on GIS (Figure 3).

Table 1. The Maps characteristics and the spatial analysis

Year	Resulting Institution	Spatial Analysis
1923	Obtained from the archive of Konya Chamber of Architects.	The base map obtained was converted from Ottoman to Turkish and land use features were digitized.
1945	The zoning infrastructure of the city was determined from the archives in physical environment.	Physical sheet format map was digitized and a land use pattern was created.
1967	City zoning plan as a raster image from Konya Meram Municipality has been obtained.	The land use pattern was digitized by performing georeferencing on the resulting image.
2000	The map of the city's zoning status was obtained from Meram Municipality in digital format.	The resulting map was converted into GIS format and all land use features were digitized.
2023	The land use pattern expressing the current situation of the city was obtained from Google Earth and Konya City Information System.	It was digitized over the database using GIS software.

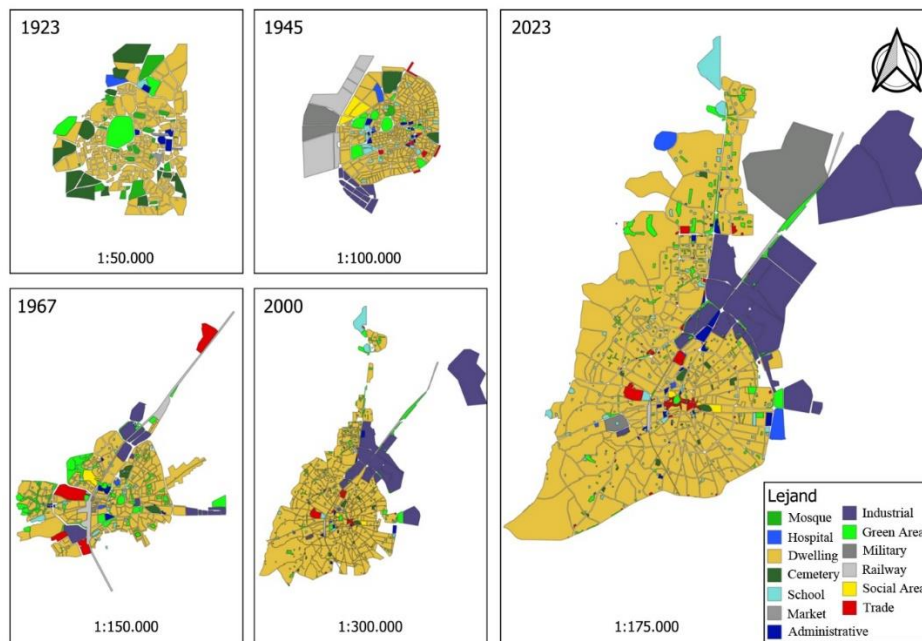


Figure 2. City maps of Konya for the years 1923-2023

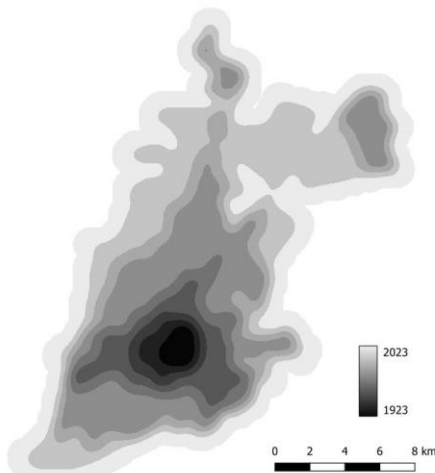


Figure 3. Representation of Konya city in the common georeference system in the years 1923, 1945, 1967, 2000, 2023

3 Method

The quantitative description of urban expansion and growth is one of the main activities of urban research. In particular, the analysis of density change is at the center of studies on measuring urban expansion [31, 35-37]. In this study, two different density metrics were used to measure urban expansion. The following calculation methods were used for these metrics:

- The mathematical formulation (Inverted S-shape Rule) that shows the general trend of the change of urban “land density” from the city center outwards.
- The number of people divided by built-up cells in the districts/municipalities where uninhabited areas are excluded.

The study compares the results of the analyses by testing two different methodologies, one of which is land density and the other is population density, on the same city over a

period of one hundred years between 1923, 1945, 1967, 2000 and 2023 and urban expansion will be examined within the scope of legislation, land use change and direction of the city. According to the analyses, spatial policies regarding the expansion process of Konya city have been formed by using SWOT analysis.

3.1 Density metric I for measuring urban expansion: Inverse S-shape Rule

Jiao [31] proposed the "Inverted S-shape Rule" for the variation of urban land density to quantitatively measure urban expansion. The inverted S-shape is a method to characterize urban form based on urban land density function and measure urban expansion. In this method, an inverse S-shaped sigmoid function is proposed to express the spatial variation of urban land density shown in Equation 1.

$$f(r) = \frac{1-c}{1+e^{\alpha((2r/D)-1)}} + c \quad (1)$$

where f is the urban land density, r is the distance from the city center, e is the Euler's constant number, c is a constant number indicating the background value of the built-up land density in the city's hinterland, and D is the estimated radius of the main urban area of a city.

The resulting urban land density function is continuous, monotonically decreasing and differentiable [31]. Figure 4 shows the graph of the function created with the constants $\alpha = 4$, $c = 0.05$ and $D = 30$, which gives the inverted S-shape.

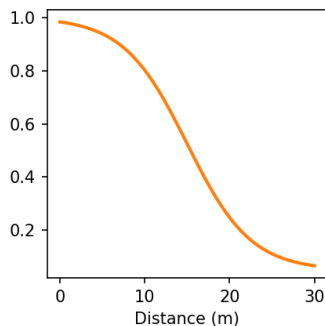


Figure 4. Inverse S-shape graph

3.2 Density metric II for measuring urban expansion: the number of people divided by built-up cells

More than half of the world's population now live in urban areas [19, 38]. The fact that population density is an increasing variable in urban areas has made it one of the most popular methods for measuring urban expansion [20, 33, 39]. However, urban expansion analysis with a land-independent population density change is a relative measurement method. [18, 28, 40].

Steurer and Bayr [21] measured urban expansion using land use data based on population density. They proposed a measure of urban expansion that takes into account population density in built-up areas, excluding areas where no one can live (e.g. streams, rivers, lakes, high mountains) or where no one is allowed to live (e.g. forests, parks or other areas outside zoning restrictions). This measure first determines the hinterland of the city, divides the city into

cells of a certain size and calculates the density by taking into account the types of land use in the cell. The formula for this density measure is shown in Equation 2.

$$D_2 = \frac{\sum_i \sum_j pop_{ij}}{\sum_i \sum_j \sum_k x_{ijk}} \quad (2)$$

where i is cell, j is the region and k is the land use types counted as housing.

3.3 SWOT analysis

SWOT, which is a strategic planning tool, creates a perspective on the subject with the titles of Strengths (Strengths) and Weaknesses (Weaknesses), Opportunities (Opportunities) and Threats (Threats) [41]. SWOT analysis technique is an easy-to-use and practical method that defines the positive and negative aspects and areas of importance for the subject, and offers a clear perspective. SWOT analysis represents an important feature for creating action strategies and strategic spatial plans especially for urban areas [42]. SWOT analysis can identify the strengths and weaknesses, opportunities and threats of a particular region, such as urban expansion.

In the literature, SWOT analysis is used to development of strategic urban planning [43], management of urban environment [44], development of urban agriculture [45], planning urban mobility [46], demonstrate to the role of stakeholder engagement [47] and determine of urban regeneration intervention [48].

In this study, SWOT analysis criteria were established by considering urban expansion metric I, which examines land density, and urban expansion metric II, which examines population density. Ferrell and Hartline [49] and Wheelen and Hunger [50] were used as an example for matching the SWOT criteria (Figure 5).

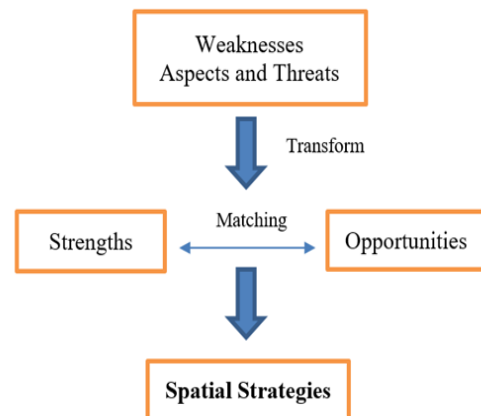


Figure 5. Matching of SWOT criteria [50-52]

The matching given in Figure 5 enables the transformation of the threats and weaknesses of the region and the development of appropriate spatial strategies for expansion by utilizing the strengths and opportunities of the region. SWOT criteria are associated with each other according to this matching technique and spatial policies are formed with expert opinions.

4 Result and discussion

4.1 Density metric I

Within the scope of the inverse S-shape rule, urban expansion processes of Konya city for the years 1923, 1945, 1975, 2000, 2023 were analyzed in the common georeference system. According to this density metric, the land density of each year was calculated and compared by years. In these calculated values, the urban hinterland, the estimated radius of the main urban area, the distance to the city center and the open and green areas representing the background value of the built land density were taken into account and urban land densities were determined (Table 2).

Table 2. Land densities in 1923, 1945, 1967, 2000, 2023 according to Inverse S

Year	α	r	D	C	f(r)
1923	4	1599	865	0.036098398	0.0362
1945	4	2849	1521	0.035983558	0.036
1967	4	7267	4581	0.039029272	0.03921
2000	4	18567	9601	0.04420525	0.04421
2023	4	18689	10738	0.06680814	0.06681

Inverted S-shape graphs representing the change in land density for each year and its comparison with each other are given in Figure 6. Here, the change of urban expansion density between 1923 and 2023 is expressed in terms of

distance. It is seen that the spread intensity between 1923 and 1945 and between 2000 and 2023 are close to each other. However, the spread of 1967 compared to 1945 and 2000 compared to 1967 is noticeably higher.

4.2 Density metric II

Land use data is used to measure urban expansion according to the number of people divided by built-up cell. For this calculation, the hinterland of the city is first determined. In the studies analyzed, the hinterland of the city varies according to the city's agricultural and geographical characteristics and urban macroform [52-54].

In the study, the hinterland of the city was determined for each year by taking the area where the built-up area of the city ends as the boundary. After determining the hinterland of the city, the land use map was divided into built-up cells for each year. WorldPop states that gridded population datasets with spatial resolution equal to 100 m by 100 m are a reliable representation of population distributions based on census data [55-58]. In this context, the land use map for each year in the study area was divided into 100 m grids (Figure 7). Within these grids, the areas that remain in the land use pattern and where no one will live are eliminated and the expansion criterion based on the population density in the built-up area is calculated. An important criterion affecting this calculation is the floor rate in buildings. The floor rates have been determined by taking an average value within the framework of plan decisions and legislation over the years. Accordingly, urban land density is calculated based on the number of people per built-up cell over the years (Table 3)

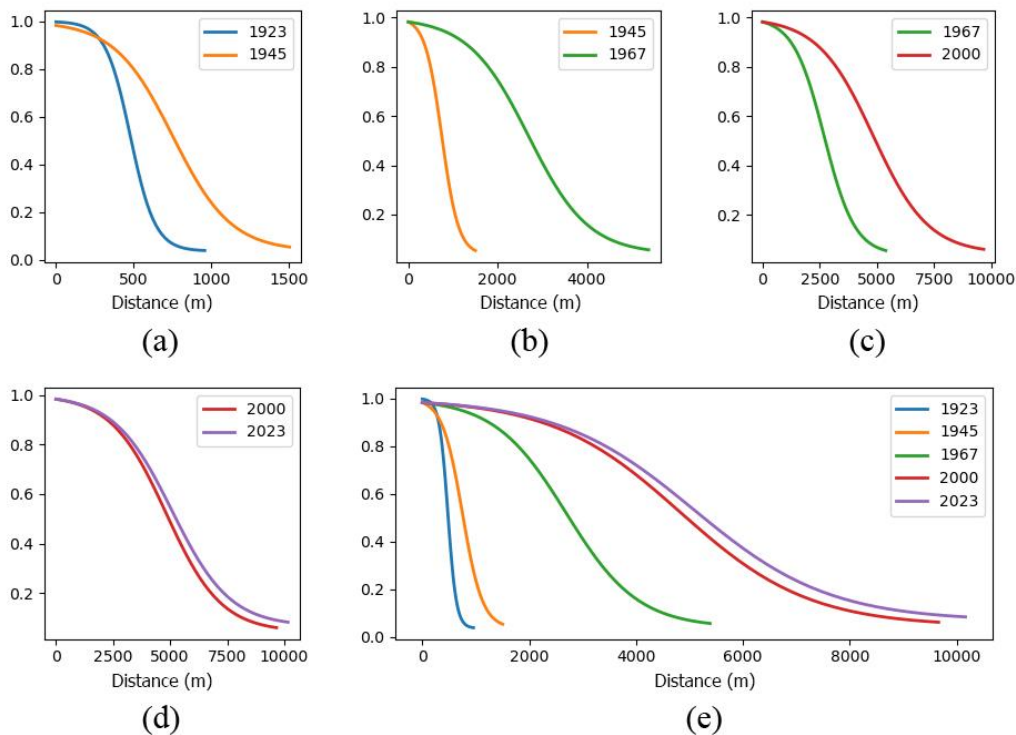


Figure 6. Urban expansion results according to the inverted S-shape rule

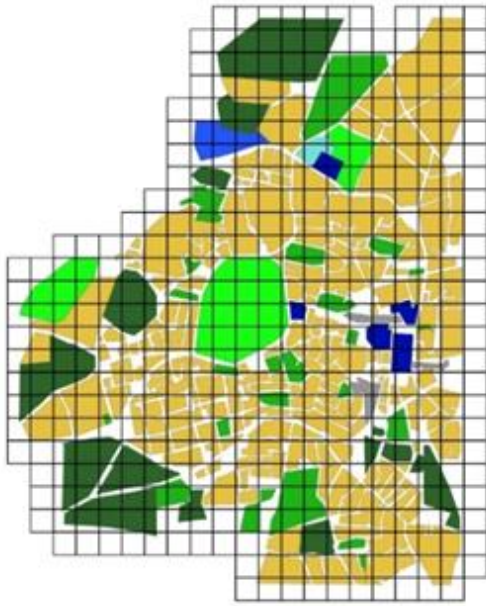


Figure 7. Example of the year 1923 for the generated built-up cells

Table 3. Land densities according to the number of people per built-up cell

Years	Average number of floors	Land densities
1923	3	0.0358
1945	3	0.02965
1967	4	0.03043
2000	5	0.05546
2023	6	0.0651

4.3 Discussion of urban expansion results according to density metrics

We compared the expansion pattern according to density metrics based on land use data for urban expansion and population data in the built-up area (Table 4).

Table 4. Comparison of the density metrics used

Years	Density Metric I based on land use	Density Metric II based on resident population
1923	0.0362	0.0358
1945	0.036	0.02965
1967	0.03921	0.03043
2000	0.04421	0.05546
2023	0.06681	0.0651

Both density prediction metrics obtained very close results on urban expansion in 1923 and 2023. In 1945, 1967 and 2000, the estimation results are close to each other, but the difference between them is mainly due to the changing

legislation and land use decisions over the years. In this context, the effects of urban expansion over the years are analyzed according to legislation and land use decisions.

4.3.1 Examination of urban expansion according to legislation

An analysis was made according to the legislative framework that influenced the change of the city in 100 years:

- 1923-1945 was the period of post-war reconstruction of the country after the proclamation of the Republic. There were laws enacted in good faith between 1923 and 1945. The Law No. 1580 on Municipalities in 1930 and the Law No. 2290 on Municipal Building and Roads in 1933 contain provisions for the regulation of urban areas within this framework. However, these legislations could not be implemented due to the lack of technical and qualified manpower, and therefore there were no major differences between 1923 and 1945 in terms of land density metric. The difference in 1945 in terms of both expansion metrics is thought to be due to the lack of statistically significant post-war population data.
- The years 1945-1967 correspond to a period in which slum settlement started in urban areas with the increasing industrialization and migration from rural to urban areas after World War II. Especially the Zoning Law No. 6785 enacted in 1957 is important for the orderly development of urban areas and the prevention of urban expansion. However, it is determined that the economic depression caused by World War II, industrialization and increased migration for employment purposes increased urban density. Periodic unreliability of population data leads to differences in both expansion metrics [59, 60].
- The years 1967-2000 were a period of political turmoil and at the same time, special laws such as the Zoning Law No. 3194, which is still being revised and used today, the Zoning Amnesty Law No. 2981 in 1984, and the Law No. 2983 in 1983 on the Protection of Cultural and Natural Assets laws were enacted. With the laws enacted in this period, cities entered a rapid development process and the population density also increased [61-62]. In this period, practices based on the Condominium Law No. 634, enacted in 1965, caused the results obtained with the density metric II based on resident population to differ from the results obtained with density metric I.
- The years 2000-2023 were a period in which urban transformation activities started and transformation activities were increased with the Law No. 6306 on Urban Transformation in Areas of Disaster Risk in 2012.

As a result, according to both density metrics, it is observed that urban expansion has increased for Konya city after 1967 in terms of both population and land use.

4.3.2 Examination of urban expansion according to land use decisions and urban development directions

Land use changes (public, green, residential and industrial areas) over the years and the urban development

directions of these areas were analyzed (Figure 8a, 8b, 8c, 8d and Figure 9a, 9b, 9c, 9d).

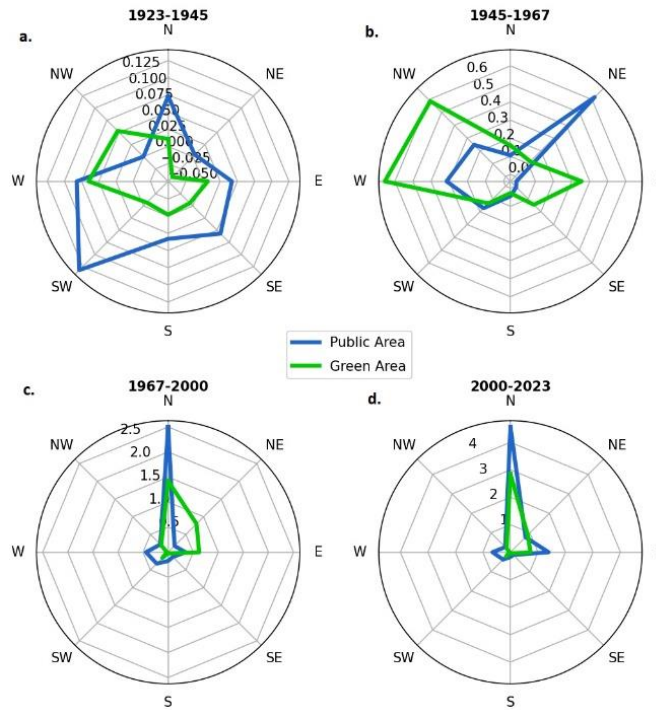


Figure 8a, 8b, 8c, 8d. Public and green space utilization and urban development directions by years

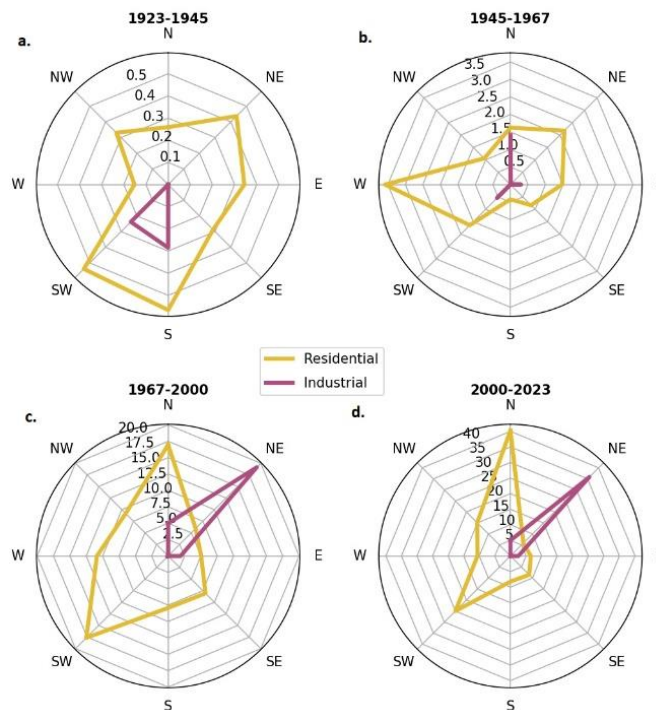


Figure 9a, 9b, 9c, 9d. Residential and industrial land uses and urban development directions by years

It has been determined that the use of public and green areas has developed in the north direction of the city after 1967. It is observed that the residential land use of the city was more homogeneous until 2000, but after 2000, it intensified in the north and south-west directions. In this period, it can be said that the city has developed rapidly in the north direction because of the university campus built in the north of the city and the light rail system developed in the north direction between the city and the campus. In addition, after 2000, the high-density construction process in the northern part of the city accelerated with the light rail system created in the previous period. After 2000, urban transformation activities increased in the west and south west of the city. It is observed that industrial areas developed in the north-east direction of the city after 1967.

4.3.3 Creating spatial policies with SWOT analysis to combat with urban expansion I in Konya

By means of SWOT analysis, the strengths and development opportunities of the city in the development process as well as the negative effects of urban expansion on the land use structure of the city and the threats to the sustainable development of the city are expressed. SWOT analysis criteria are as in [Table 5](#).

Table 5. SWOT analysis criteria

STRONG ASPECTS
(S1) Increase in public areas (educational and health facilities) in the southern direction of the city
(S2) Development of public transport services in the eastern part of the city
(S3) Increasing urban regeneration activities in the west and south of the city
(S4) Existence of light rail system
WEAK ASPECTS
(W1) Development of the city's residential, industrial and green area utilization in a certain direction
(W2) Moving away from a human-scale settlement
(W3) Transformation of the city from a spider web urban form to a form with a linear spread in the north direction
(W4) Clustering of public transport services in certain directions within the hinterland
OPPORTUNITIES
(O1) No geographical obstacle in the planning of the city
(O2) The city is developed in terms of university and religious tourism
(O3) Dense green areas in the southern region
(O4) The city had a compact urban form in the past
THREATS
(T1) Clustering of public areas (educational, health and administrative facilities) in a certain direction of the city
(T2) Clustering of public transport mostly in the north and east of the city
(T3) Tendency of the city towards high-rise expansion in the north direction and opening up more car and development areas
(T4) Increase in carbon emission caused by the traffic density of the city spreading in linear form

The identified SWOT criteria were associated with each other according to the matching technique expressed in [Figure 5](#) and spatial policies were determined to prevent urban expansion:

- Public, residential, industry and green space uses are concentrated in a certain direction within the city and cause regional inequality. The land use distribution should be integrated with green areas by being organized in accordance with the urban transformation activities starting in the west and south directions of the city (W1T1-S3O3). Thus, a homogeneous distribution of the urban expansion effect developing in a certain direction can be ensured in the city.
- Within the hinterland of the city, light rail public transportation services are concentrated in certain directions. In the planning of the city, the existing light rail systems should be developed by utilizing the geographical suitability of the area (W4T2- S2O1). By increasing the accessibility of transportation services to the entire city, the light rail systems concentrated in the north of the city can be concentrated in the south and southwest directions.
- There is an increase of high-rise development areas in linear form in the northern direction of the city. Transformation in the west and south directions for a compact development of the city urban density should be re-planned with the applications (W3T3-S3O4). The western and southern parts of the city should be redeveloped through urban transformation due to the worn-out urban fabric. Thus, urban density can be balanced with a homogeneous distribution throughout the city without urban expansion.
- Increasing development areas in the city in a linear form in the north direction leads to increased traffic density and more carbon emissions. For this reason, the city's existing light rail system should be integrated with green areas and expanded in the east and south directions (W3T4-S4O3). Thus, an urban fabric that is sensitive to climate change and has increased accessibility to green areas can be created.
- The city is becoming densely populated with high-rise buildings and is moving towards a settlement that is far from human scale. Opportunities to transform the city into compact and human-scaled settlements with increasing urban regeneration activities in the west and south should be seized (W2T3- S3O4). By increasing the transformation processes in the west and south of the city, the spreading effect can be reduced and the homogeneous distribution of the city can be ensured.
- The development trend of the city in the north direction has led to the concentration of public spaces in this direction. The city's development in the south direction should be planned by using the newly developing universities and tourism potential (W3T1-S1O2)

5 Conclusion

Measuring urban expansion provides an important framework for determining the effects of the urbanization process on rural areas, environmental characteristics and a sustainable development process. In this study, the 100-year urbanization experience and expansion process of Konya, which was the capital of the Seljuk civilization in Türkiye and is today at the forefront of faith tourism, is examined.

Density change criterion, which is frequently used in urban expansion processes, has been analyzed and compared based on land use and population data and legislative framework. In a 100-year period, the strengths and development opportunities in the development of the urban area and the positive and negative aspects affecting the expansion were analyzed by SWOT analysis and spatial policies for the future were formed. There is a need to organize urban policies for Konya city as stated below:

- Re-planning the direction of urban development through transformation and reconstruction activities to prevent regional inequalities,
- The realization of a human-scale and compact settlement form from high-rise residential use and
- Establishing the use of public transportation to arrangement the city in the form of a spider web, rather than in a certain direction of the city.
- Creation of reserve areas for homogeneous distribution of residential areas and public spaces
- Development of green areas integrated with public transportation in the south and west directions

Based on the city of Konya, it can be said that the correct reading of urban expansion processes for each city is very important for the sustainable and livable development of cities.

Acknowledgement

This article is a part of Gülsüm Eoğlu's master's thesis titled "Spatio-Temporal Modeling of Urban Sprawl Using Cellular Automata Method".

Conflict of interest

The authors affirm that none of their known financial conflicts of interest or personal connections could have appeared to impact the research presented in this study.

Similarity rate (iThenticate): 14%

References

- [1] Ş. Kaypak, Modernizmden postmodernizme değişen kentleşme. *Global Journal of Economics and Business Studies*, 2(4), 80-95, 2013.
- [2] P. Tunçer, Sustainable urbanization policies and Turkey. *Electronic Turkish Studies*, 11(2), 2016. <http://dx.doi.org/10.7827/TurkishStudies.9366>
- [3] G. Şaylan, Postmodernizm, Ankara. İmge Kitabevi, 2001.
- [4] E. H. Kaya, and A. T. Susan, Sürdürülebilir bir kentleşme yaklaşımı olarak, ekolojik planlama ve ekokentler. *İdealkent*, 11 (30), 909-937, 2020. <https://doi.org/10.31198/idealkent.533730>
- [5] A. Kayan, The Reflections of urbanization policies before the planning period. *International Journal of Social Science Research*, 6 (2), 158-183, 2017.
- [6] G. A. Gonzalez, Urban sprawl, global warming, and the empire of capital. New York, ABD: State University of New York Press, 2009.
- [7] S. Öztürk, and H. Çalışkan, Kentleşme gelişiminin ekonomik büyüme üzerine etkisi: Türkiye örneği. *İğdır Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 17, 677-694, 2019.
- [8] H. Blumenfeld, On the growth of metropolitan areas. *Social Forces*, 28, 59-64, 1949. <https://doi.org/10.2307/2572099>
- [9] R. Lopez and H.P. Hynes, Sprawl in the 1990: measurement distribution, and trends. *Urban Affairs Rev.* 38, 325-355, 2003. <https://doi.org/10.1177/10780874022388>
- [10] F. Terzi and F. Bölen, İstanbul'da şehirselleşmenin ölçülmesi. *İTÜ dergisi/A Mimarlık, Planlama, Tasarım* 9 (2), 166-178, 2010.
- [11] D. Sezgin and Ç. Varol, Ankara'daki kentsel büyüme ve şehirselleşmenin verimli tarım topraklarının amaç dışı kullanımına etkisi. *METU JFA*, 29 (1), 273-288, 2012. <https://doi.org/10.4305/metu.jfa.2012.1.15>
- [12] C. Z. Çavuş and A. Başaran Uysal, Çanakkale'de kentsel gelişme, yayılma ve kırsal alanlarla etkileşim. *Planlama Ek 1*, 105-117, 2018. <https://doi.org/10.14744/planlama.2018.85547>
- [13] European Environment Agency, Urban Sprawl in Europe: Joint EEA-FOEN Report. 2016, <https://www.eea.europa.eu/publications/urban-sprawl-in-europe> , Accessed 24 January 2024.
- [14] G., Hayrullahoğlu, Y., Aliefendioğlu and H. Tanrıvermiş, Kentsel yayılma alanları ve bu alanlardaki konut talebi üzerine nitel bir araştırma. *İdealkent*, 12 (34), 1413-1439, 2021. <https://doi.org/10.31198/idealkent.873343>
- [15] A.-F. Morote and M. Hernández, Urban sprawl and its effects on water demand: a case study of Alicante, Spain. *Land Use Policy* 50, 352-362, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.06.032>
- [16] K. Karabacak, Türkiye'deki Büyükşehir belediyesi şehirlerde kentsel yayılma. *Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi*, 60 (1), 158-178, 2020. <https://doi.org/10.33171/dtcfjournal.2020.60.1.9>
- [17] M. P. Johnson, Environmental impacts of urban sprawl: A survey of the literature and proposed research agenda. *Environ. Plan. A* 2001, 33, 717-735. <https://doi.org/10.1068/a3327>
- [18] L. Liu, Z. Peng, H. Wu, H. Jiao, Y. Yu and J. Zhao, Fast identification of urban sprawl based on K-means clustering with population density and local spatial entropy. *Sustainability*, 10 (8), 2683, 2018. <https://doi.org/10.3390/su10082683>
- [19] M. Bosch, J. Chenal and S. Joost, Addressing urban sprawl from the complexity sciences. *Urban Science*, 3

- (2), 60, 2019. <https://doi.org/10.3390/urbansci3020060>
- [20] W. Zhou, M. Jiao, W. Yu and J. Wang, Urban sprawl in a megaregion: A multiple spatial and temporal perspective. *Ecological Indicators*, 96, 54-66, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.10.035>
- [21] M. Steurer and C. Bayr, Measuring urban sprawl using land use data. *Land Use Policy*, 97, 104799, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104799>
- [22] Q. Feng, and P. Gauthier, Untangling urban sprawl and climate change: a review of the literature on physical planning and transportation drivers. *Atmosphere*, 12 (5), 547, 2021. <https://doi.org/10.3390/atmos12050547>
- [23] A. Frenkel and M. Ashkenazi, The integrated sprawl index: measuring the urban landscape in Israel. *Ann. Reg. Sci.* 42, 99–121, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00168-007-0137-3>
- [24] W. Yue, L. Zhang and Y. Liu, Measuring sprawl in large Chinese cities along the Yangtze River Via combined single and multidimensional metrics. *Habitat Int.* 57, 43–52, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2016.06.009>
- [25] L. Tian, Y. Li, Y. Yan, B. Wang, Measuring urban sprawl and exploring the role planning plays: A Shanghai case study. *Land Use Policy*, 67, 426–435, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.06.002>
- [26] M. K. Jat, P. K. Garg and D. Khare, Modelling of urban growth using spatial analysis techniques: A case study of Ajmer city (India). *International Journal of Remote Sensing*, 29 (2), 543–567, 2008. <https://doi.org/10.1080/01431160701280983>
- [27] R.H. Ewing, Characteristics, causes, and effects of sprawl: a literature review. In *Urban Ecology*; Springer: Boston, MA, USA, pp. 519–535, 2008. https://doi.org/10.1007/978-0-387-73412-5_34
- [28] B. Bhatta, S. Saraswati, D. Bandyopadhyay, Quantifying the degree-of-freedom, degree-of-sprawl, and degree-of-goodness of urban growth from remote sensing data. *Appl. Geogr.* 30, 96–111, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2009.08.001>
- [29] S. Encarnação, M. Gaudiano, F.C. Santos, J.A. Tenedório, J.M. Pacheco, Urban dynamics, fractals and generalized entropy. *Entropy*, 15, 2679–2697, 2013. <https://doi.org/10.3390/e15072679>
- [30] X. Xu, and X. Min, Quantifying spatiotemporal patterns of urban expansion in China using remote sensing data. *Cities*, 35, 104–113, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2013.05.002>
- [31] L. Jiao, Urban land density function: A new method to characterize urban expansion. *Landscape and Urban Planning*, 139, 26-39, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.017>
- [32] J., Yang, G. Song, and J. Lin, Measuring spatial structure of China's megaregions. *J. Urban Plann. Dev.* 141, 04014021, 2014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.000020](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.000020)
- [33] H. Taubenböck, J. Ferstl and S. Dech, Regions set in stone—classifying and categorizing regions in Europe by settlement patterns derived from EO-data. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 6, 1–27, 2017. <https://doi.org/10.3390/ijgi6020055>
- [34] H. Akseki and M. Ç. Meşhur, Kentsel yayılma sonucu yapılaşmaya açılan verimli tarım alanları: Konya kenti deneyimleri. *Megaron*, 8 (3), 165. 2013. [10.5505/MEGARON.2013.99609](https://doi.org/10.5505/MEGARON.2013.99609)
- [35] H. Öncel and M. Ç. Meşhur, Konya kentsel alanının büyümesinde kentsel saçaklanma ve nedenleri. *Planlama*, 31 (2). 2021. <https://doi.org/10.14744/planlama.2021.04127>
- [36] M. B. S. Aydın and E. D. Kahraman, Kompakt kent ölçütlerinden biri olan yoğunluk tespiti ve değerlendirmesi: Türkiye kentleri (İl merkezleri) Örneği, *Planlama*, 29 (2), 171-193, 2019. <https://doi.org/10.14744/planlama.2019.86547>
- [37] M., Güneş, Hücresel otomat tabanlı sleuth model kullanılarak kentsel büyümenin tarım alanları üzerindeki etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2023. <https://hdl.handle.net/20.500.13091/5079>
- [38] United Nations, *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*; United Nations: New York, NY, USA, 2018.
- [39] A. Schneider and C.E. Woodcock, Compact, dispersed, fragmented, extensive? A comparison of urban growth in twenty-five global cities using remotely sensed data, pattern metrics and census information. *Urban Stud.* 45, 659–692, 2008. <https://doi.org/10.1177/0042098007087340>
- [40] B. Singh, Urban Growth Using Shannon's Entropy: A Case Study of Rohtak City. *Int. J. Adv. Remote Sens. Gis*, 3, 544–552, 2014.
- [41] H. Halaç and H. Akdağ, SWOT analysis method for creating strategic plans of immovable cultural assets; Mardin Kasımiye (Sultan Kasim) Madrasa Sample. *The Journal of International Lingual Social and Educational Sciences*, 4 (1), 65-77, 2018.
- [42] S. Tsenkova, Reinventing strategic planning in post-socialist cities: Experiences from Sofa. *European Planning Studies*, 15 (3), 295–317, 2007. <https://doi.org/10.1080/09654310601017133>
- [43] F. A. Halla, SWOT analysis of strategic urban development planning: The case of Dar es Salaam city in Tanzania. *Habitat international*, 31 (1), 130-142, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2006.08.001>
- [44] M. Pazouki, S.A. Jozi and Y.A. Ziari, Strategic management in urban environment using SWOT and QSPM model. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 3 (2), 207-216, 2017. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2017.03.02.009>
- [45] P. Ramaloo, C., Siwar, C.Y. Liong and A. Isahak, Identification of strategies for urban agriculture development: A SWOT analysis. *Planning Malaysia*, 16, 2018. <https://doi.org/10.21837/pm.v16i7.521>
- [46] U. Kramar, D. Dragan, and D. Topolšek, The holistic approach to urban mobility planning with a modified focus group, SWOT, and fuzzy analytical hierarchical

- process. *Sustainability*, 11 (23), 6599, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11236599>
- [47] J.S.D. Eugenio-Vela, X., Ginesta and M. Kavaratzis, The critical role of stakeholder engagement in a place branding strategy: A case study of the Empordà brand. *European Planning Studies*, 2019. <https://doi.org/10.1080/09654313.2019.1701294>
- [48] S. Jayaprakash and V. Swamy, Spatial SWOT analysis: an approach for urban regeneration. in international conference on civil engineering trends and challenges for sustainability Singapore: Springer Nature Singapore, 2021, 21-38.
- [49] O.C. Ferrell and M.D. Hartline, *Marketing strategy* (5th ed.). Cengage Publishing, 2011.
- [50] T.L. Wheelen and J.D. Hunger, *Strategic management and business policy*. Addison-Wesley Publishing Company, 1995.
- [51] A. Bozdağ, A spatial analysis for sustainable planning of tourism impacts using GIS: Çesme (Cyssus), İzmir, Turkey. *Environment, Development and Sustainability*, 25 (9), 9877-9902, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02464-7>
- [52] N. Brenner, The hinterland urbanised?. *Architectural Design*, 86 (4), 118-127, 2016. <https://doi.org/10.1002/ad.2077>
- [53] Y. Cen, P. Zhang, Y. Yan, W. Jing, Y. Zhang, Y. Li, D. Yang, X., Liu, W. Geng and T. Rong, Spatial and temporal agglomeration characteristics and coupling relationship of urban built-up land and economic hinterland—A case study of the lower Yellow River, China. *Sustainability*, 11 (19), 5218, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11195218>
- [54] C. Liang, J. Zeng, R.C. Zhang and Q.W. Wang, Connecting urban area with rural hinterland: A stepwise ecological security network construction approach in the urban–rural fringe. *Ecological Indicators*, 138, 108794, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108794>
- [55] A.J. Tatem, A.M. Noor, C. von Hagen, A. DiGregorio, S.I. Hay. High resolution population maps for low income nations: combining land cover and census in East Africa. *PLoS One*. 2 (12), 1298. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001298>, 2007. 5
- [56] V.A. Alegana, P.M. Atkinson, C. Pezzulo, A. Sorichetta D. Weiss, T. Bird, E. Erbach-Schoenberg and A.J. Tatem, Fine resolution mapping of population age-structures for health and development applications. *J R Soc Interface*, 12:20150073, 2015. <https://doi.org/10.1098/rsif.2015.0073>
- [57] B. Calka, J. Nowak Da Costa, and E. Bielecka, Fine scale population density data and its application in risk assessment. *Geomatics, natural hazards and Risk*, 8(2), 1440-1455, 2017. <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1345792>
- [58] URL 1: <https://www.worldpop.org/> , Accessed 01.04. 2024.
- [59] K. Başol, *Demografi*, Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Yayınları, İzmir, 1984.
- [60] E. Yılmaz and S. Çiftçi, Kentlerin ortaya çıkışı ve sosyo-politik açıdan türkiye'de kentleşme dönemleri. *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, 10 (35), 252-267. 2011.
- [61] R. Keleş, *Kentleşme politikası*, İmge Yayınları, Ankara. 2008.
- [62] İ. Tekeli, *Modernizm, modernite ve Türkiye'nin kent planlama tarihi*, Tarih Vakfı Yurt Yayınları, İstanbul, 2009.





6 Şubat depremlerinden etkilenen şehirlere ait OpenStreetMap verilerinin niceliksel ve semantik analizi

Quantitative and semantic analysis of OpenStreetMap data for cities affected by the February 6 earthquakes

Abdulkadir Memduhoğlu^{1,*} 

¹ Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 63290, Şanlıurfa, Türkiye
¹ Heidelberg Üniversitesi, Coğrafya Enstitüsü, 69120, Heidelberg, Almanya (Misafir Araştırmacı)

Öz

OpenStreetMap (OSM), afet sonrası harita üretimi için de kullanılabilen gönüllü tabanlı ve açık erişimli bir platform sunar. Bu platform, özellikle afet öncesi ve sonrası hazırlıklar, arama-kurtarma ve yardım faaliyetlerinde kullanılmak üzere mekânsal verilerin geniş çapta erişilebilir olmasını sağlar. Ancak, OSM'deki kullanıcı esnekliği ve gönüllülerin çoğunun uzman olmayışı, veri kalitesi ve bütünlüğü konularında endişelere neden olmaktadır. Verilerin analitik yöntemlerle değerlendirilmesi bu sebeple önem taşır. Bu çalışmada, OSM'nin gelişimi ve afet durumlarında nasıl kullanıldığı incelenmiştir. 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Kahramanmaraş depremi sonrası oluşturulan OSM verileri, niceliksel ve semantik olarak değerlendirilmiş; deprem öncesi ve sonrası 12 aylık dönemde 8 şehirdeki bina, yol ve ilgi noktaları analiz edilmiştir. Araştırmaya göre, yeni eklenen bina verileri Türkiye'nin toplam bina envanterinin %32'sini, yol verileri toplam yol ağının %6'sını, ilgi noktaları ise %1'ini temsil etmektedir. Ayrıca, semantik eksiklikler tespit edilerek, çeşitli kullanım alanlarında sorunlara yol açabilecekleri belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: 6 Şubat depremleri, Afet sonrası harita üretimi, Mekânsal veri analizi, OpenStreetMap

1 Giriş

Depremler, doğası gereği oluş zamanı bakımından tahmin edilmesi zor bir afet türüdür. Özellikle yerleşim yerlerine yakın bölgelerde meydana gelen şiddetli depremler ani ve büyük zararlara yol açabilir. Bu tarz yıkıcı depremler sadece binaları değil aynı zamanda toplumları da derinden etkiler. Her türlü felakette olduğu gibi, deprem sonrası arama, kurtarma ve yardım faaliyetleri de kritik öneme sahiptir. Bu faaliyetlerin hızlı ve etkili olabilmesi için mevcut olanakların doğru bir şekilde kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle, afetin etkilerini hızlı bir şekilde belirlemek ve hasar tespiti yapmak kritik bir öneme sahiptir [1].

Bu bağlamda, güncel uydu ve uzay teknolojileri kullanılarak oluşturulan haritalar, sadece mevcut hasarı gözler önüne sermekle kalmayıp, aynı zamanda altyapı ve nüfus dağılımı gibi önemli verileri de sağlayarak arama,

Abstract

OpenStreetMap (OSM) provides a volunteer-based, open-access platform that can also be used for post-disaster map production. This platform enables widespread access to spatial data, particularly for pre- and post-disaster preparedness, search and rescue, and relief operations. However, the flexibility of user contributions and the predominance of non-expert volunteers in OSM raise concerns about data quality and integrity. Thus, analytical evaluation of these data is critical. This study examines the development of OSM and its application in disaster situations. Following the Kahramanmaraş earthquake on February 6, 2023, OSM data created were quantitatively and semantically assessed; building, road, and point of interest data over a 12-month period before and after the earthquake in eight cities were analyzed. According to the research, the newly added building data represent 32% of Turkey's total building inventory, road data 6% of the total road network, and points of interest 1%. Additionally, semantic deficiencies were identified, potentially causing issues in various usage contexts.

Keywords: February 6 earthquakes, Post-disaster mapping, Spatial data analysis, OpenStreetMap

kurtarma ve yardım faaliyetlerine yön veren temel bilgileri sunmaktadır [2], [3], [4]. Uydu görüntülerinin analizi, afet sonrası bölgenin ihtiyaçlarını belirlemede ve acil müdahale stratejileri oluşturmada önemli bir araçtır [5]. Ayrıca, bu teknolojiler, yerel yönetimlere ve acil durum ekiplerine olay anında hızlı ve doğru bilgi sağlayarak tepki süreçlerini optimize etmelerine yardımcı olabilir.

Afetler sırasında ve sonrasında, güncel ve ayrıntılı coğrafi verilerin hızlı bir şekilde toplanması ve paylaşılması, kurtarma ve yeniden yapılanma çabalarını büyük ölçüde etkileyebilir. OpenStreetMap (OSM) küresel çapta mekânsal veri sağlayan, açık erişimli ve gönüllülük esasına dayalı bir harita sunum platformudur. OSM platformunun esnek yapısı ve geniş kullanıcı tabanı, afet bölgesindeki hızlı değişimleri etkili bir şekilde yansıtma ve bu bilgileri hızla güncelleme kapasitesine sahiptir [6]. Bu, özellikle yollar, binalar ve diğer kritik altyapıların durumu gibi hayati bilgilerin

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: akadir@harran.edu.tr (A. Memduhoglu)
Geliş / Received: 01.05.2024 Kabul / Accepted: 13.08.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1476998

toplanmasında önemlidir. Ayrıca, OSM'nin kullanıcı katkılarına dayalı modeli, yerel halkın ve saha çalışanlarının, bölgenin güncel durumu hakkında doğrudan bilgi sağlamasına olanak tanır, bu da veri toplama sürecini yerleştirir ve hızlandırır.

Fakat kendi bünyesinde bir doğrulama sistemi bulunmasına karşın, harita verisi üretimine dair yeterli bilgisi olmayan kullanıcıların çoğunlukta olması, OSM'deki veri kalitesi ve doğruluk konusunda önemli bir kaygı unsuru oluşturmaktadır. Bu nedenle, OSM'nin doğuşundan bu yana, araştırmacılar OSM verileri üzerinde birçok kalite ve doğruluk incelemesi yapmıştır [7], [8], [9]. OSM, yapılan tüm düzenlemelerin kaydını tutarak bu düzenlemelerin kim tarafından yapıldığını da belirlemekte ve araştırmacılara geçmiş düzenlemelere dair mekânsal veri analizleri yapabileceği imkânı sunmaktadır. Bu durum, araştırmacılara diğer online haritalarda bulunmayan, gelişim süreçlerini izleme bağlamında benzersiz bir araştırma ve çeşitli alanlarda (örn. Turistik haritalar) kullanım olanağı sunmaktadır [10].

OSM platformunda, kullanıcıların etiket oluşturma süreci oldukça esnek ve kullanıcı odaklı bir yapıya sahiptir. Kullanıcılar, coğrafi nesnelere tanımlarken OSM wiki'de yer alan standart etiketleme rehberlerine başvurabilir ve aynı zamanda kendi özel etiketlerini de oluşturma özgürlüğüne sahiptir. Bu, OSM'nin esnek yapısını yansıtır ve kullanıcılara yerel bilgi ve ihtiyaçlarına uygun etiketler geliştirme imkânı tanır. Ancak bu durum, veri homojenliği ve tutarlılığı açısından bazı zorlukları da beraberinde getirir. Standart dışı etiketlerin kullanımı, veri setlerinin analizi ve entegrasyonunda zorluklara yol açabilir ve bu da veri kalitesi ve kullanılabilirliği etkiler [11].

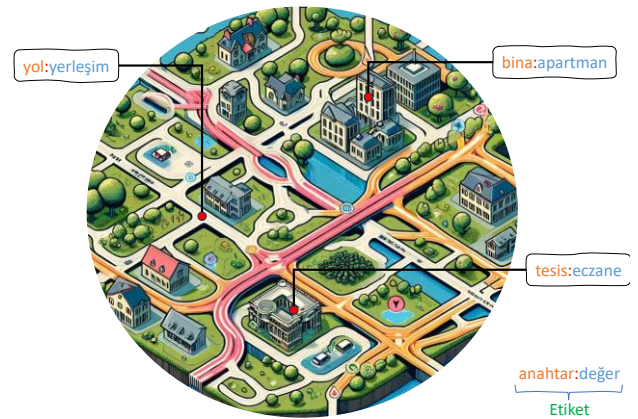
OSM veri setinin tamlığı, coğrafi kapsamı ve ayrıntı düzeyi bakımından değişkenlik gösterir; bu durum, gönüllü katkıların yoğunluğuna ve yerel bilgiye erişim seviyelerine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu heterojen yapı, bazı bölgelerde verinin oldukça ayrıntılı ve kapsamlı olmasına karşın, diğer bölgelerde eksik veya daha az ayrıntılı olabileceğini gösterir [12]. Bu nedenle, OSM verilerinin kullanımını sırasında, veri tamlığı, heterojenliği ve amaç için uygunluk gibi faktörlerin dikkatlice değerlendirilmesi ve bu unsurların projenin hedefleriyle nasıl uyum sağladığının analiz edilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, öncelikle OSM'nin gelişimi, mevcut durumu ve afet durumlarındaki kullanımı ortaya konmuş ardından Kahramanmaraş depremleri sonrasında üretilen OSM verileri niceliksel ve semantik bağlamda ele alınarak sonuçlarıyla birlikte irdelenmiştir. Depremden altı ay önceki ve sonraki dönemi kapsayan on iki aylık bir süreçte, depremden en fazla etkilenen ve İnsani OpenStreetMap Takımı (Humanitarian OpenStreetMap Team – HOT) tarafından harita üretim çalışmaları gerçekleştirilen sekiz şehir temel alınmıştır. Bu şehirlerdeki OSM bina, yol ve ilgi noktası (Point of Interest - POI) verileri zamansal açıdan analiz edilmiş, bulgular ayrıntılı grafikler ve tablolarla sunulmuştur. Çalışmanın sonraki bölümünde, OSM'nin gelişimi ve afet durumlarında kullanımı ele alınmış, ardından ilgili literatür çalışmasına, yöntem, bulgular ve son olarak sonuç bölümlerine yer verilmiştir.

1.1 OSM'nin gelişimi, mevcut durumu ve afet durumlarındaki kullanımı

2004 yılında kurulan OSM, coğrafi verileri serbestçe dağıtmayı hedefleyen bir platformdur. Veri ve dağıtımın geliştirilmesi için 2006'da OpenStreetMap Vakfı oluşturulmuş, 2008'de GPS birimlerine veri aktarımını kolaylaştıran araçlar ve 2013'te kullanıcı dostu iD editörü geliştirilmiştir [13]. Bu adımlar, OSM verilerinin çeşitli amaçlar için erişilebilirliğini ve kullanılabilirliğini arttırmıştır. OSM, düzenlenebilir bir küresel harita sunar ve içeriği: detaylar, düğümler, yollar ve ilişkiler olarak tanımlanır; bu öğeler etiketlerle nitelendirilir. Ekim 2023 itibarıyla, OSM 11 milyondan fazla kayıtlı ve 50 bin aylık aktif kullanıcıya sahiptir [14].

OSM'nin veri yapısı, esnek bir 'anahtar:değer' (key:value) etiketleme sistemine dayanır. Coğrafi nesnelere tanımlama için çeşitli anahtarlar (örn. 'highway', 'building') ve bu anahtarlarla ilişkilendirilen değerler (örn. 'highway=primary', 'building=yes') kullanılır (Şekil 1). OSM, kullanıcılarına geniş etiketleme özgürlüğü sunarak, farklı coğrafi ve kültürel bölgelere uyum sağlar. Ancak, etiket kullanımı konusunda önerilerde bulunan OSM wiki'ye rağmen, bu serbest etiketleme veri tabanında heterojenlik sorunlarına yol açmaktadır. Haritanın temelini oluşturan yol ve bina nesnelere yanısıra OSM, kullanıcılar tarafından oluşturulmuş ve sürekli güncellenen geniş bir ilgi noktaları (POI) envanteri sunar. Bu envanter, gastronomiden sağlık hizmetlerine, eğitim kurumlarından tarihi ve kültürel mirasa kadar geniş bir çeşitlilik gösterir.



Şekil 1. OSM'de nesnelere tanımlama için kullanılan etiket sistemi

Son dönemde, OSM açık coğrafi veri tabanına katkı yapan ve bu verileri kullanarak bir ekosistem oluşturan çeşitli gruplar ortaya çıkmıştır. Bu gruplar arasında gönüllü harita üretim toplulukları, özel sektör, hükümet kurumları ve insani yardım organizasyonları bulunmaktadır. Özellikle, gönüllü gruplar insani harita üretim faaliyetleri ile öne çıkmakta, bu süreç genellikle uydu görüntülerine dayanan uzaktan harita üretimi ve sayısallaştırma yöntemlerini içermektedir. Fiziksel varlık gerektirmeden, bu faaliyetler küresel iş birliği ile dünya genelindeki gönüllüler tarafından yürütülmektedir [15].

İnsani harita üretimi, teknoloji aracılığıyla yardım faaliyetlerini destekler ve çeşitlendirir. Bu yaklaşım, afet bölgelerindeki yapıların ve yolların haritalanması ve uzaktan algılama yöntemleri kullanılarak krizin toplumsal etkilerinin değerlendirilmesi gibi çeşitli şekillerde uygulanabilir. Ayrıca, yardım personeli ve kaynaklarının yönlendirilmesi, acil tahliye yollarının tespiti ve toplulukların uzun vadeli gelişimine katkıda bulunma gibi alanlarda etkin rol oynar. Haritacıların iş birliği ve kaynak paylaşımı, kriz müdahalesini daha kapsamlı ve etkili hale getirir [16].

Kar amacı gütmeyen bir organizasyon olan HOT insani amaçlar doğrultusunda haritaların güncellenmesi için çalışmalar yürütmektedir [17]. HOT, 2010 yılında Haiti'deki yıkıcı depremin ardından kurulmuş olup, o zamandan bu yana OSM aracılığıyla gerçekleştirilen çeşitli afet sonrası topluluk aktivasyonlarında önemli roller üstlenmiştir. HOT'nin kuruluşu ve faaliyetleri, OSM'nin afet yönetimi ve insani yardım alanlarında nasıl stratejik bir kaynak olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Bu organizasyonun çalışmaları, afet müdahale stratejilerinde OSM'nin değerini ve potansiyelini artırmış ve bu platformun afet yönetimi ve insani yardım çalışmalarında daha geniş bir kabul görmesini sağlamıştır.

6 Şubat 2023 tarihinde, Kahramanmaraş merkezli ve ardışık olarak 7.6 ve 7.7 büyüklüğünde gerçekleşen depremler, Adana, Adıyaman, Diyarbakır, Elazığ, Gaziantep, Hatay, Kahramanmaraş, Kilis, Malatya, Osmaniye ve Şanlıurfa dâhil olmak üzere 11 şehirde, Türkiye'nin nüfusunun yaklaşık %16,4'üne denk gelen 14 milyon kişinin yaşadığı bölgelerde yaygın hasara neden olmuştur [18]. Depremler sonrasında HOT tarafından üstlenilen rol, önemli bir etki yaratmıştır. HOT'nin aktivasyon ekibi, Türk açık harita üretim topluluğu Yer Çizenler ile iş birliği yaparak, kısmen haritalanmış ve yoğun nüfuslu olan bu bölgelerdeki verileri güncellemiştir. Türkiye ve Suriye'nin bir kısmını da içine alan deprem bölgesinde bir aydan kısa bir zaman zarfında 9 bine yakın gönüllü tarafından OSM'de yaklaşık 80 bin km yol ve 2 milyon bina çizimi, düzenlemesi ve doğrulaması tamamlanmıştır [19]. Bu veriler, AKUT ve Türkiye Cumhuriyeti İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) gibi kurumların arama ve kurtarma faaliyetlerinde koordinasyon ve lojistik kaynakların etkin kullanımı için temel oluşturmuştur.

Bu çabalar, afet sonrası iyileştirme süreçlerinde de önemli bir kaynak olarak değerlendirilmiştir. Özellikle, altyapı ve konut inşası ile afet hazırlığındaki iyileştirmelerde kullanılan bu ayrıntılı ve güncel harita verileri, stratejik bir öneme sahiptir. Uluslararası Kızılhaç ve Kızılay Dernekleri Federasyonu (IFRC), afet sonrası hasar değerlendirmeleri için bina düzeyindeki vektör verilerini, hükümet verileri ve felaket öncesi OSM bina geometrileri ile HOT verilerinin birleştirilmesiyle elde edilen coğrafi analizlerde kullanmıştır. Bu analizler, yardım ve iyileştirme çabalarının planlanması için yıkılan her binanın tam konumunun belirlenmesine yardımcı olmuştur [20].

1.2 İlgili çalışmalar ve motivasyon

OSM zaman içinde gelişen ve bu gelişimi OSM tarih dosyası (OSM history file) formatı yardımıyla açıkça incelenebilen bir yapı ortaya koyar. Bundan dolayı OSM verilerinin gelişiminin farklı yönlerini vurgulayan birçok çalışma ortaya konmuştur. Zhao vd. (2015) [21], Pekin'deki OSM yol ağlarının büyümesine yoğunlaşmış ve bu genişlemeyi artan sayıda gönüllü katılımcıya bağlamışlardır. Bu gelişim teması, Hacı (2022) [22] tarafından daha da derinleştirilmiş, makine öğrenimi yaklaşımını kullanarak OSM gönüllülerinin bina alanlarını nasıl haritaladığını analiz etmiş ve geometrik ve semantik harita üretim eğilimlerindeki desenleri ortaya çıkarmıştır. Herfort vd. (2021) [15], OSM'deki küresel harita üretim çabalarını inceleyerek daha geniş bir tarihsel perspektif sunmuştur. Analizleri, 2008'den bu yana binalar ve yolların önemli ölçüde eklendiğini, gelişmişlik endeksi yüksek olan bölgelere doğru belirgin bir eğilim olduğunu ortaya koymuş, böylece farklı alanlarda veri kapsamındaki dengesizliklere dikkat çekmiştir.

OSM, profesyoneller ve resmi kurumlar yerine, herkesin katkıda bulunabildiği açık ve katılımcı bir yaklaşımı benimseyerek, klasik haritalardan ayrılır [23]. Bu durum OSM'nin kalitesi ve tamlığı ile ilgili heterojenlik problemlerinin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bu bağlamda, OSM kalite değerlendirilmesi ile ilgili birçok önemli çalışma ortaya çıkmıştır. Mooney vd. (2010) [9], OSM'deki mekânsal veri kalitesi değerlendirmesinin zorluklarını ele alarak, gerçek verilere bağımlı olmayan denetimsiz kalite ölçümlerinin gerekliliğini vurgulamışlardır. Mondzech & Sester (2011) [24], katılımcı coğrafi bilgilerin değerlendirilmesine yönelik bir yöntem sunarak, özellikle OSM verilerini Almanya'nın resmi topografik ve kartografik mekânsal veri tabanı olan ATKIS ile yaya navigasyon doğruluğu açısından karşılaştırmışlardır. Barron vd. (2014) [7] ise, 25'ten fazla yöntem içeren kapsamlı bir çerçeve geliştirerek, dış referans verilerine dayanmadan OSM verilerinin çeşitli yönlerden içsel olarak değerlendirilmesine büyük bir katkıda bulunmuşlardır. Çabuk vd. (2015) [25], OSM verilerinin resmi 1/ 50.000 ölçekli harita üretiminde kullanımının pratik faydalarını göstermiş, veri heterojenliği ve konum hataları konusunda uyarıcı bir notla birlikte %25'lik bir verimlilik artışına dikkat çekmiştir.

Verilerin genel kalitesinin değerlendirilmesinin yanında, OSM verilerinin kalitesi farklı alanlara uygulanabilirliği bağlamında da çeşitli çalışmalarda incelenmiştir. Sehra vd. (2017) [26], OSM'deki veri setlerinin eksikliğinin navigasyon rotaları üzerindeki etkisini incelemiş, eksik yol ağlarının ve dönüş kısıtlamalarının oluşturulan yolların doğruluğunu önemli ölçüde etkilediğini ortaya çıkarmışlardır. Basaraner (2020) [27], İstanbul'daki binaların geometrik ve semantik kalitesine odaklanmış, OSM'nin resmi veri setine kıyasla daha ayrıntılı tipler sunduğunu, ancak anlamsal uyumsuzluklar ve veri güncelliği konusunda zorluklar bulunduğunu belirtmiştir. Benzer bir şekilde Küçük & Anbaroğlu (2019) [28], OSM'deki 'büyük bina' katmanının mekânsal doğruluğunu Türkiye'nin resmi TOPOVT veri tabanıyla karşılaştırmak için Hausdorff mesafesini kullanmış, OSM verilerinin resmi veri setleriyle

iyi bir uyum potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymuştur. Biljecki vd. (2023) [29] OSM'deki yapı stokunun coğrafi ve tanımlayıcı verilerinin kalitesini, tamlık, tutarlılık ve doğruluk açısından incelemişlerdir. Araştırmaları, veri kalitesinin farklı bölgelere göre değişken olduğunu; ancak kat sayıları ve bina türü gibi sıklıkla doğru olan özellikler içeren OSM'nin kapsamlı veri setinin, dijital ikiz üretimi gibi çeşitli uygulama alanlarına potansiyel faydalar sağlayabileceğini ortaya koymaktadır.

Literatürde, afet sonrası ve hazırlık senaryolarında OSM kullanımına dair araştırmalar bulunmaktadır ve bu çalışmalar özellikle OSM'nin afet bağlamındaki gelişimini analiz etmektedir. Eckle & Porto De Albuquerque (2015) [8], felaket senaryolarında uzaktan katkıda bulunan haritacıların OSM veri kalitesini incelemiş ve bu katkıda bulunanların yerel coğrafi bilgi konusundaki eksikliklerine dikkat çekmiştir. Dittus vd. (2017) [30], HOT faaliyetleri üzerinden bir analiz gerçekleştirerek katılımcı etkileşimi ile harita üretimi sonuçları üzerindeki koordinasyon uygulamalarının etkisini incelemiştir. Araştırma, kriz durumlarında hem yeni hem de aktif üyeleri harekete geçirmede HOT'nin rolünü vurgulamaktadır. Auer vd. (2018) [31], Nepal ve Haiti'den örnek olay incelemeleri kullanarak felaket yönetiminde "ohsome" isimli OSM geçmişi analiz platformunun faydasını göstermiştir. Felaketler sonrası başlangıçtaki harita üretimi çabalarının veri kalitesini tehlikeye atabileceğini, ancak sonraki düzenlemelerin genellikle bakım ve doğruluğunu artırdığını tespit etmişlerdir. Son olarak, Anderson vd. (2018) [32], insani ve güvenlik açısından kritik senaryolarda OSM'deki mekânsal veriler için kullanılmak üzere içsel kalite metrikleri önermiştir. Benzer şekilde, OSM afet öncesi ve sonrası durum analizlerinde, özellikle nispeten az gelişmiş ülkelerde yaygın olarak kullanılmaktadır [33-35].

OSM'ye katkı sağlayan gönüllülerin davranışları ve katılımları üzerine yapılan incelemeler, kitle kaynaklı harita üretim süreçlerinin dinamiklerine ilişkin önemli bilgiler sağlamaktadır. Mooney & Corcoran (2014) [36], kullanıcıların küçük bir kısmının harita üretim çalışmalarının yapılan işlerin çoğunluğuna katkıda bulunduğunu tespit etmişlerdir. Hacı vd. (2018) [37] ise, katkıda bulunanların deneyim seviyelerinin, Ankara'da harita üretimi aşamasında yol verilerinin, girdilerinin detayı ve kalitesini önemli ölçüde etkilediğini bulmuşlardır. Zia vd. (2019) [38], Türkiye'nin OSM veri setinin mekânsal evrimini sosyo-ekonomik faktörlerle ilişkilendirerek, detay yoğunluğunun nüfus yoğunluğu ve okuryazarlık seviyeleriyle uyumlu olduğunu ortaya koymuşlardır. Hacı (2020) [39] tarafından yapılan çalışmada, OSM yerleşim içi yolların semantik çeşitlilik açısından zengin fakat semantik bilgilerin (etiket değerlerinin) tamlığı açısından henüz yeterli seviyede olmadığını bulmuştur.

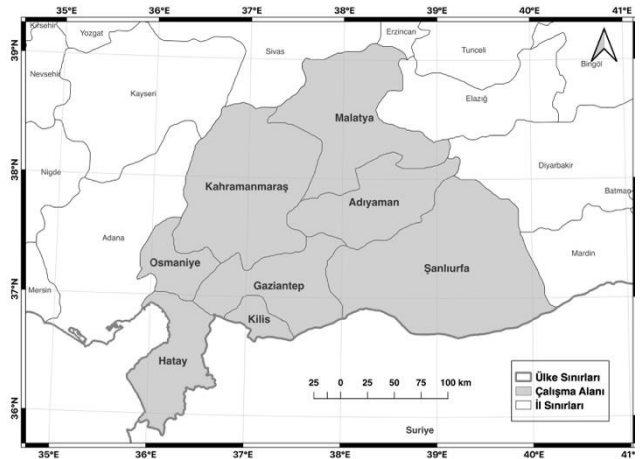
Bu gelişmeler, OSM veri analizi alanında yenilikçi yaklaşımların ve araçların geliştirilmesinin önemini vurgulamaktadır. Minghini & Frassinelli (2019) [40], "OSM güncel mi?" adında, OSM verilerinin kalitesini tarihsel analiz yoluyla değerlendirmek üzere tasarlanmış açık kaynaklı bir web uygulaması tanıtmışlardır. Bu araç, OSM nesnelerinin güncelliğini ve güvenilirliğini değerlendirmek

için çeşitli göstergeler kullanmakta, ancak bu tür değerlendirmelerde kaçınılmaz olan öznel faktörleri de hesaba katmaktadır. Martini vd. (2019) [41], OSM verilerinin tarihçesini oluşturmak için yenilikçi bir kavram sunmuş, zamanla otomatik değişiklik analizi ve görselleştirme olanakları sağlamışlardır. Ayrıca, referans bir veri setine ihtiyaç duymadan OSM Tüm Geçmiş verisi (Full History) kullanılarak otomatik veri kalitesi değerlendirmesi için bir yöntem önermişlerdir. Bu öncü çalışmalar, OSM verilerinin evrimini ve kalitesini değerlendirme, görselleştirme ve anlama yeteneğinde büyük bir sıçrama temsil etmekte, araştırmacılar ve uygulayıcılar için verilerin kullanımını büyük ölçüde artırmaktadır.

Bu bilgiler ışığında, literatürde OSM verilerinin geometrik içsel ve dışsal kalite analizlerine sıklıkla yer verilirken, semantik analizlerin oranının nispeten daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. Bunun yanı sıra, afet sonrası OSM faaliyetlerinin incelenmesine yönelik çalışmaların literatürde oldukça kısıtlı olduğu dikkate değerdir. Özellikle, normal koşullarda elde edilen OSM veri üretiminden farklı dinamiklere sahip olan afet sonrası veri analizlerinin önemi bu bağlamda belirginleşmektedir. Mevcut bilgilere göre, bu araştırma Türkiye'deki 6 Şubat depremlerinin ardından OSM verilerinin incelendiği ilk çalışmayı temsil etmektedir. Ayrıca, Herfort vd. (2021) [15] tarafından ele alınan, OSM'nin gelişmişlik endeksi yüksek bölgelere yönelik yanlılığı ve HOT faaliyetlerinin potansiyel olarak bu eğilimi dengeleyici olumlu etkileri de bu çalışma kapsamında değerlendirilecektir.

2 Yöntem

Kahramanmaraş merkezli depremler 11 şehri kapsayan büyük bir bölgede yıkıma sebep olmasına rağmen çalışma alanı olarak depremin daha yoğun etkilediği ve HOT faaliyetlerinin de yoğunlaştığı 8 şehir (Gaziantep, Hatay, Kahramanmaraş, Kilis, Malatya, Osmaniye, Adıyaman, Şanlıurfa) seçilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. 6 Şubat depremlerinden en çok etkilenen ve HOT faaliyetlerinin yürütüldüğü çalışma alanı

Niceliksel ve semantik analiz için gerekli olan OSM geçmiş verisi, kâr amacı gütmeyen ve yardım faaliyetlerine yardımcı olmayı amaçlayan HeiGIT firması tarafından

üretilen “ohsome” isimli aracı kullanılarak temin edilmiştir [42]. “ohsome” kullanıcılar için tüm özelliklerin bir Python kütüphanesiyle birlikte kullanılabilirdiği gelişmiş bir API’in yanında, daha kolay erişilebilen “dashboard” adında bir web arayüzü de sunmaktadır [43]. “Ohsome”, OSM’nin tam tarihli verilerini küresel ölçekte çeşitli veri analizi görevleri için daha kolay erişilebilir hale getirmeyi amaçlamaktadır. “Ohsome” platformunun uygulamaları, web panolarından veri kalitesi değerlendirmesine ve özel veri analizlerine kadar uzanmaktadır. Web arayüzünden OSM ile ilgili tamlık ve güncellik gibi bazı içsel kalite analizlerine de ulaşmak mümkündür. “ohsome” aracı kullanılarak depremden etkilenen 8 şehri kapsayan 12 aylık bina, yol ve ilgi noktası verileri Python API kullanılarak elde edilmiş ve bu veriler grafik ve tablolar yardımıyla yorumlanabilir hale getirilmiştir. OSM’de yer alan bina sayısı, bina alanı, yol uzunluğu, ilgi noktası sayısı, sağlık tesisi sayısı ve park alanları gibi unsurların deprem öncesi ve sonrasında zamansal olarak nasıl değiştiği niceliksel olarak analiz edilmiştir. Ayrıca, depremin ardından ilk altı ay içerisinde eklenen bina, yol ve ilgi noktası gibi mekânsal nesnelere, en sık kullanılan etiketlerin sayısı, benzersiz değerleri ve doluluk oranları açısından semantik olarak incelenmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

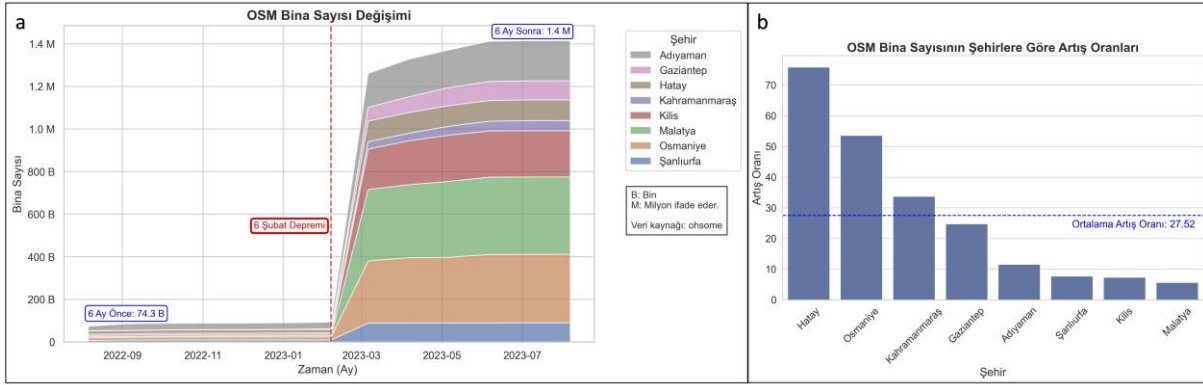
Elde edilen OSM verileri, Niceliksel Analiz ve Semantik Analiz olmak üzere iki ana başlık altında kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Niceliksel analiz kapsamında, OSM’deki mekânsal nesnelere deprem öncesi ve sonrasındaki

altı aylık dönemler için şehirlere göre ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Semantik analizde ise mekânsal nesnelere için kullanılan etiketlerin istatistikleri incelenmiş; ayrıca, önemli olduğu değerlendirilen bazı etiket değerleri ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır.

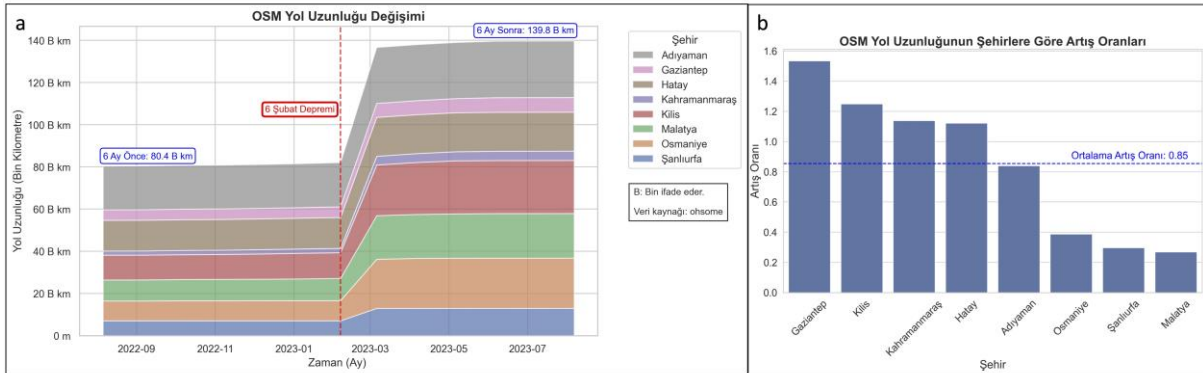
3.1 Niceliksel analiz

Araştırmada gerçekleştirilen analizler, deprem öncesi ve sonrası durumlar karşılaştırıldığında OSM veri tabanındaki bina sayısında önemli bir artış olduğunu göstermiştir. Deprem öncesinde, incelenen bölgede OSM’de bulunan bina sayısı yaklaşık 74 bin iken, bu sayı deprem sonrasında yaklaşık 1,4 milyona yükselmiştir (Şekil 3a). Bu, deprem öncesi duruma göre yaklaşık 19 katlık bir artışa denk gelmektedir. OSM’deki bina sayısındaki artış oranının şehirlere göre dağılımı incelendiğinde, Hatay’da yaklaşık 75 kat ile en yüksek artışın, Malatya’da ise yaklaşık 5 kat ile en düşük artışın gerçekleştiği tespit edilmiştir (Şekil 3b).

Binaların ardından en dikkat çekici ikinci değişim yolların uzunluğunda gözlemlenmiştir. Deprem öncesinde, çalışma alanındaki toplam yol uzunluğu yaklaşık 80 bin kilometre iken, gönüllülerin katkıları sayesinde bu rakam deprem sonrasında, %75’lik bir artışla, yaklaşık 140 bin kilometreye yükselmiştir (Şekil 4a). Bu artışın şehirlere göre dağılımı incelendiğinde, Gaziantep’te yaklaşık %150 ile en yüksek artışın meydana geldiği, buna karşın Malatya’da yaklaşık %20 ile en düşük artışın gözlemlendiği belirlenmiştir (Şekil 4b).

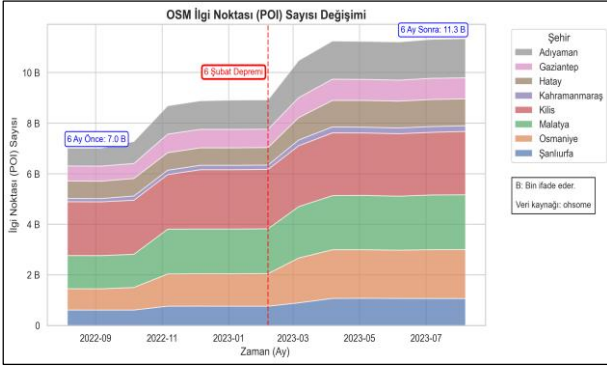


Şekil 3. (a) OSM bina sayısının zamana ve şehirlere göre değişimi ve (b) şehirlere göre artış oranı



Şekil 4. (a) OSM yol uzunluğunun zamana ve şehirlere göre dağılımı ve (b) şehirlere göre artış oranları

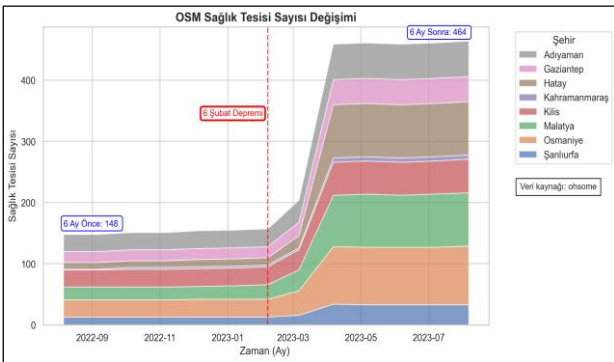
OSM ilgi noktaları incelendiğinde ise depremden altı ay öncesinde yaklaşık 7 bin seviyesinde olan toplam sayının depremden 3 ay önce 9 bin seviyelerine çıktığı, depremden sonra ise yaklaşık %22'lik bir artışla 11 bin seviyesine geldiği görülmektedir (Şekil 5). Depremden üç ay önce meydana gelen bu yükselişin bölgede gerçekleşen başka bir insani haritacılık faaliyeti (HOT, mapathon vb.) olabileceği değerlendirilmektedir.



Şekil 5. OSM ilgi noktası değişimi zamana ve şehirlere göre dağılımı

İlgi noktaları içinde önemli bir yere sahip olan sağlık tesisleri de ayrıca incelenmiştir. Depremden önce sayısı 148 olan sağlık tesisleri, depremden sonra yaklaşık 3 kat artarak 464'e çıkmıştır (Şekil 6). Sağlık tesisleri arasında hastaneler ve özel klinikler yer almaktadır.

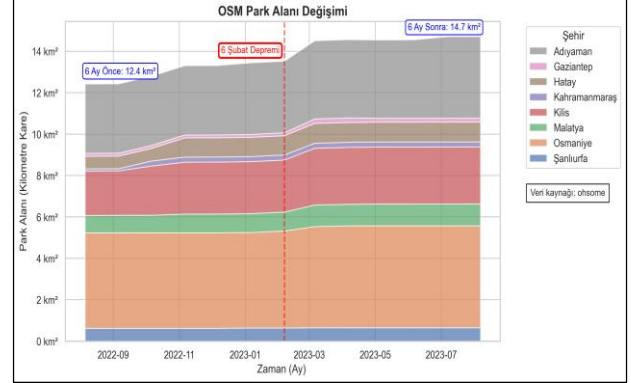
Depremden sonra insanların toplandığı veya geçici bir süre barınma ihtiyacının karşılandığı park alanları incelendiğinde, depremden önce yaklaşık 12 km² olan park alanları depremden sonra yaklaşık 15 km² seviyesine çıkmasına rağmen toplam çalışma alanı için yaklaşık %20'lik bir artışa sahne olmuştur (Şekil 7).



Şekil 6. OSM Sağlık Tesisi değişiminin zamana ve şehirlere göre dağılımı

Depremden hemen sonra HOT ve benzeri sivil toplum kuruluşlarının organizasyonunda yerli ve yabancı birçok gönüllü harita faaliyetleri gerçekleştirmiştir. Çalışma bölgesine katkı veren gönüllü sayıları incelendiğinde, deprem öncesinde sayının 20 civarından deprem anından hemen sonra en yüksek seviye olan 9.430'a çıkmış ve depremden altı ay sonra da 45'e düşmüş olduğu

görülmektedir (Şekil 8a). Depremden hemen sonraki, gönüllü faaliyetlerinin yoğun olduğu zaman diliminde gönüllülerin şehirlere göre yoğunluğu incelendiğinde Gaziantep ve Kilis'in diğer şehirlere göre daha yoğun bir gönüllü oranına sahip olduğu görülmektedir (Şekil 8b).

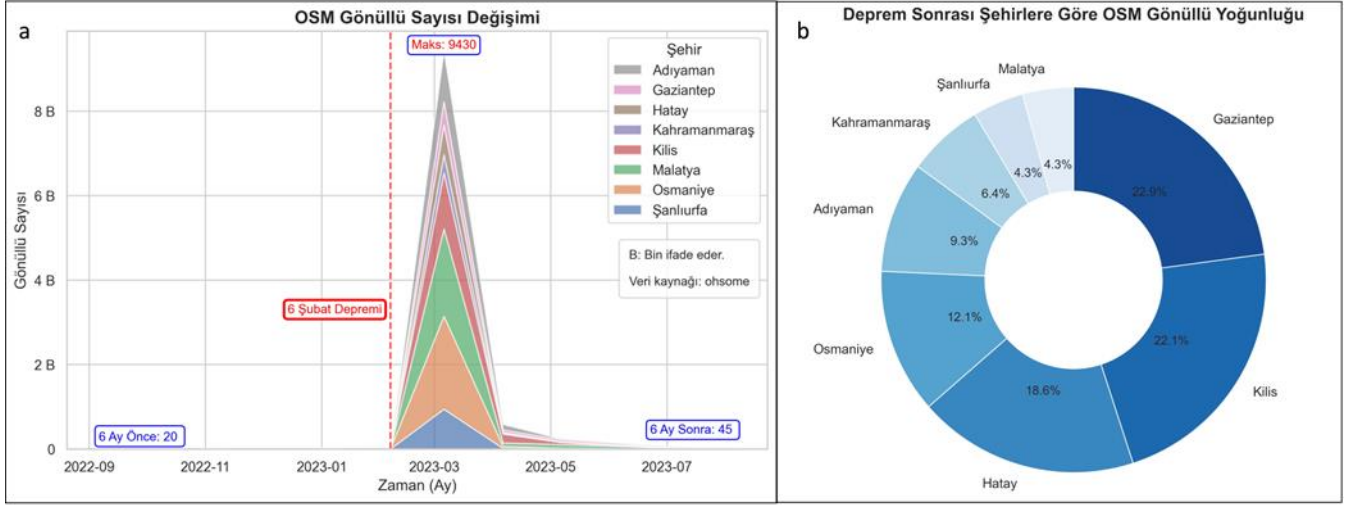


Şekil 7. OSM park alanının zamana ve şehirlere göre dağılımı

3.2 Semantik analiz

Deprem sonrasında OSM'ye eklenen nesnelere, binalar, yollar ve ilgi noktaları olmak üzere üç ana kategoride semantik olarak incelenmiştir. Her kategori içerisinde, özellikle belirgin olan anahtarlar için ayrıntılı tablolar hazırlanarak analiz edilmiştir. Bu gruplara ait öğelerin öznelikleri, benzersiz değerleri ve bu değerlerin doluluk oranları tablolarla ortaya konmuştur. OSM'nin serbest yapısı sebebiyle potansiyel olarak sınırsız sayıda anahtar ve değer bulunabilir. Bu nedenle, genellikle doluluk oranı binde birin üzerinde olan değerler araştırmaya dâhil edilmiştir. Doluluk oranı binde birin altında olan ve istisnai durumları temsil eden durumlar için ise en yüksek sayıya sahip beş değer analize alınmıştır.

Deprem sonrasında eklendiği belirlenen bina nesnelere üzerinde yapılan semantik analiz, doluluk oranlarına göre iki önemli anahtarın öne çıktığını göstermektedir (Tablo 1). Bunlar, sırasıyla %100 ve yaklaşık %41 doluluk oranlarına sahip 'bina' (building) ve 'kaynak' (source) anahtarlarıdır. 'Bina' anahtarı, kapalı geometrik bir alanın bir yapıyı temsil ettiğini gösteren en yaygın kullanılan 'evet' değeri ile karakterize edilir. Ayrıca, bu anahtar binanın ev, cami, okul gibi çeşitli kullanım türlerini de belirtebilir. Binanın türü bilinmiyorsa veya çizim sırasında önemsenmiyorsa, genellikle 'evet' olarak varsayılan bu değer ile doldurulur, bu da doluluk oranını tam yapar. OSM bina verilerini elde etmek için kullanılan yazılımda bir bina filtresi kullanıldığı için bina etiketi %100 doluluk oranına sahiptir. Bu, kullanıcı tarafından bina olarak belirtilmeyen nesnelere dışarıda bırakıldığı anlamına gelir. Son yıllarda piyasaya sürülen, iD gibi OSM harita üretim araçları, bazı zorunlu etiket tanımları aracılığıyla bu tür durumları minimuma indirir de bu koşulların dikkate alınması gerekmektedir. 'Bina' ve 'kaynak' anahtarlarının yanı sıra, katman, hasar türü, hasar olayı ve isim gibi diğer anahtarlar da binde bir ile binde iki arasındaki doluluk oranlarına sahiptir.



Şekil 8. (a) OSM gönüllü sayısının zamana göre değişimi ve (b) şehirlere göre gönüllü yoğunluğu

Tablo 1. Depremden sonra eklenen bina nesnelere ait bazı anahtar istatistikleri

Anahtar	Sayı	Benzersiz Değer	Doluluk (%)
Bina	1326420	261	100
Kaynak	536956	98	40.5
Katman	2652	29	0.2
Hasar: türü	139	7	0.1
Hasar: olayı	1367	12	0.1
İsim	1354	882	0.1

Bina nesnelere en yüksek doluluk oranlarına sahip olan 'bina' ve 'kaynak' anahtarlarını inceleyen bir ayrıntı tablosu hazırlanmıştır (Tablo 2). Yaklaşık 1,3 milyon binayı kapsayan ve tam dolu olarak sıklıkla kullanılan 'bina' anahtarının analizi, toplam 261 benzersiz değer kaydedilmiş olmasına karşın, bu değerlerin %99'unun 'evet' olarak girildiğini ortaya koymaktadır. Diğer bir deyişle, binanın kullanım türünü belirten değerlerin yüzdesi %1'den azdır. Kalan kısımda en sık rastlanan değerler, binde 2 oranıyla 'sera' ve binde 1 oranıyla ise 'apartman', 'mesken' ve 'endüstriyel' şeklindedir. İkinci en yüksek doluluğa sahip olan 'kaynak' anahtarına yapılan inceleme, 98 benzersiz değere sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu değerler arasında %40 oranında kullanılan 'microsoft/BuildingFootprints', eklenen binalarda kaynağı belirtilen binaların büyük bir kısmının (bu, kaynak bilgisi bulunan yolların %99,7'sini temsil eder) Microsoft kaynaklı olduğunu belirtmektedir. Diğer anahtar değerleri ise binde 1'den düşük doluluk oranlarına sahiptir.

Yol nesnelere kullanılan anahtarların doluluk oranlarına dayanarak yapılan değerler sıralamasında, 'yol' (highway), 'kaynak' (source), 'yüzey' (surface), 'isim' (name) ve 'tek_yön' (oneway) anahtarları öne çıkmaktadır. Bu anahtarlar sırasıyla yolun tipini, kaynağını, yüzey tipini, adını ve trafik akış yönünü tanımlar. Bunlardan ilk ikisi doluluk oranlarıyla diğerlerinden ayrılmaktadır. OSM içerisinde, 'yol' (highway) ile ilgili etiketler, yollar, patikalar ve diğer ulaşım hatlarının sınıflandırılmasında kullanılmaktadır ve üretim aşamasında doldurulması gerekli

olduğundan tam doluluğa sahiptir. Bu etiket, yolun tipini, önemini ve kullanım şeklini tanımlamak için kritik bir rol oynamaktadır. Örneğin, 'highway=motorway' etiketi otoyollar için, 'highway=footway' ise yaya patikaları için kullanılmaktadır. İncelenen çalışma alanında, deprem sonrası eklenen yol nesnelere semantik analizi, yaklaşık 154 bin yol nesnesinin 119 farklı yol tipine sahip olduğunu göstermektedir (Tablo 3). 'Kaynak' (source) değeri ise yol verilerinin hangi kaynaktan elde edildiğini gösterir ve yol verilerinin doğruluğu ve güncelliği açısından önem taşır. Örneğin, 'source=bing' veya 'source=maxar' etiketleri, yol verilerinin Bing Maps veya Maxar Technologies tarafından sağlanan uydu görüntülerinden elde edildiğini belirtir. Yapılan analizde tüm eklenen yolların %44'ünde kaynak verisinin yer aldığı ve 109 benzersiz değerin yer aldığı tespit edilmiştir.

Tablo 2. Bina nesnelere için en çok kullanılan anahtar değerlerine ait bazı istatistikler

Anahtar	Değer	Sayı	Doluluk (%)
Bina	Evete	1315743	99.2
	Sera	201	0.2
	Apartment	1902	0.1
	Mesken	1444	0.1
	Endüstriyel	1142	0.1
Kaynak	Microsoft/BuildingFootp.	535327	40.4
	maxar	337	<0.1
	Maxar	284	<0.1
	UNMappers	269	<0.1
	maxar Premium	195	<0.1

'Yol' (highway) anahtarı tam doluluk oranına sahip olduğundan doluluk oranı değerleri dağılım oranını göstermektedir. En çok kullanılan değerler çoktan aza doğru: 'patika' (track), 'yerleşim' (residential), 'sınıflandırılmamış' (unclassified), 'hizmet' (service) ve 'üçüncül' (tertiary)

şeklinde sıralanabilir (Tablo 4). 'Patika' genellikle kaba veya asfaltlanmamış yolları ve doğal alanlardaki patikaları temsil ederken, toplam eklenen yolların % 43'üne denk gelmektedir. Konut amaçlı kullanılan yerleşim bölgelerindeki yolları ifade eden 'yerleşim' (residential) değeri ise toplam eklenen yolların %34'ünü oluşturmaktadır. Kaynak anahtarının analizi, toplam yol sayısına göre hesaplanan doluluk oranına göre yolların %42'sinin (bu, kaynak bilgisi bulunan yolların %96'sını temsil eder) Maxar tarafından sağlanan verilere dayandığı sonucunu ortaya koymaktadır.

Tablo 3. Depremden sonra eklenen yol nesnelere ait bazı anahtar istatistikleri

Anahtar	Sayı	Benzersiz Değer	Doluluk (%)
Yol	154128	119	100
Kaynak	67888	109	44.0
Yüzey	5600	78	3.6
İsim	1706	1166	1.1
Tek_yön	1703	17	1.1
Katman	1091	20	0.7
Hizmet	974	26	0.6
Yol_türü	846	33	0.5
Köprü	832	10	0.5

Tablo 4. Yol nesnelere için en çok kullanılan anahtar değerlerine ait bazı istatistikler

Anahtar	Değer	Sayı	Doluluk (%)
Yol	Patika	66844	43.4
	Yerleşim	52593	34.1
	Sınıflandırılmamış	19075	12.4
	Hizmet	11036	7.2
	Üçüncül	2061	1.3
Kaynak	Maxar	65011	42.2
	Bing	1583	1.0
	Maxar Premium	349	0.2
	Digitalglobe	293	0.2
	Mapbox	179	0.1

Çalışma alanındaki ilgi noktaları için tanımlanan anahtarlar incelendiğinde: 'isim' anahtarı ilgi noktasının adını belirtirken, 'kaynak' verinin kaynağını gösterir. 'Kontrol_tarihi' ise verinin son kontrol veya güncelleme tarihini ifade ederken, tesis (amenity) değeri, restoranlar, bankalar, okullar gibi çeşitli hizmet ve tesis tiplerini tanımlamak için kullanılır. Bu bilgiler, ilgi noktalarının kullanıcılar için daha kullanışlı ve faydalı hale gelmesine yardımcı olur. Örneğin, bir sağlık merkezinin adı, konumu, telefon numarası ve kontrol tarihi gibi bilgiler bu sayede elde edilebilir. Yapılan analizde, deprem sonrası 2722 yeni ilgi noktasının eklendiği tespit edilmiştir (Tablo 5). İlgi noktalarının anahtar doluluk oranları, bina ve yol doluluk oranlarına kıyasla görece daha yüksektir. En yüksek doluluk oranı, %90 civarında olan 'isim' anahtarında görülmüştür. Bu anahtar, sırasıyla %79, %78 ve %58'lik doluluk oranlarına sahip 'kaynak', 'kontrol_tarihi' ve 'tesis' anahtarları izlemektedir.

Tablo 5. Depremden sonra eklenen ilgi noktalarına ait bazı anahtar istatistikleri

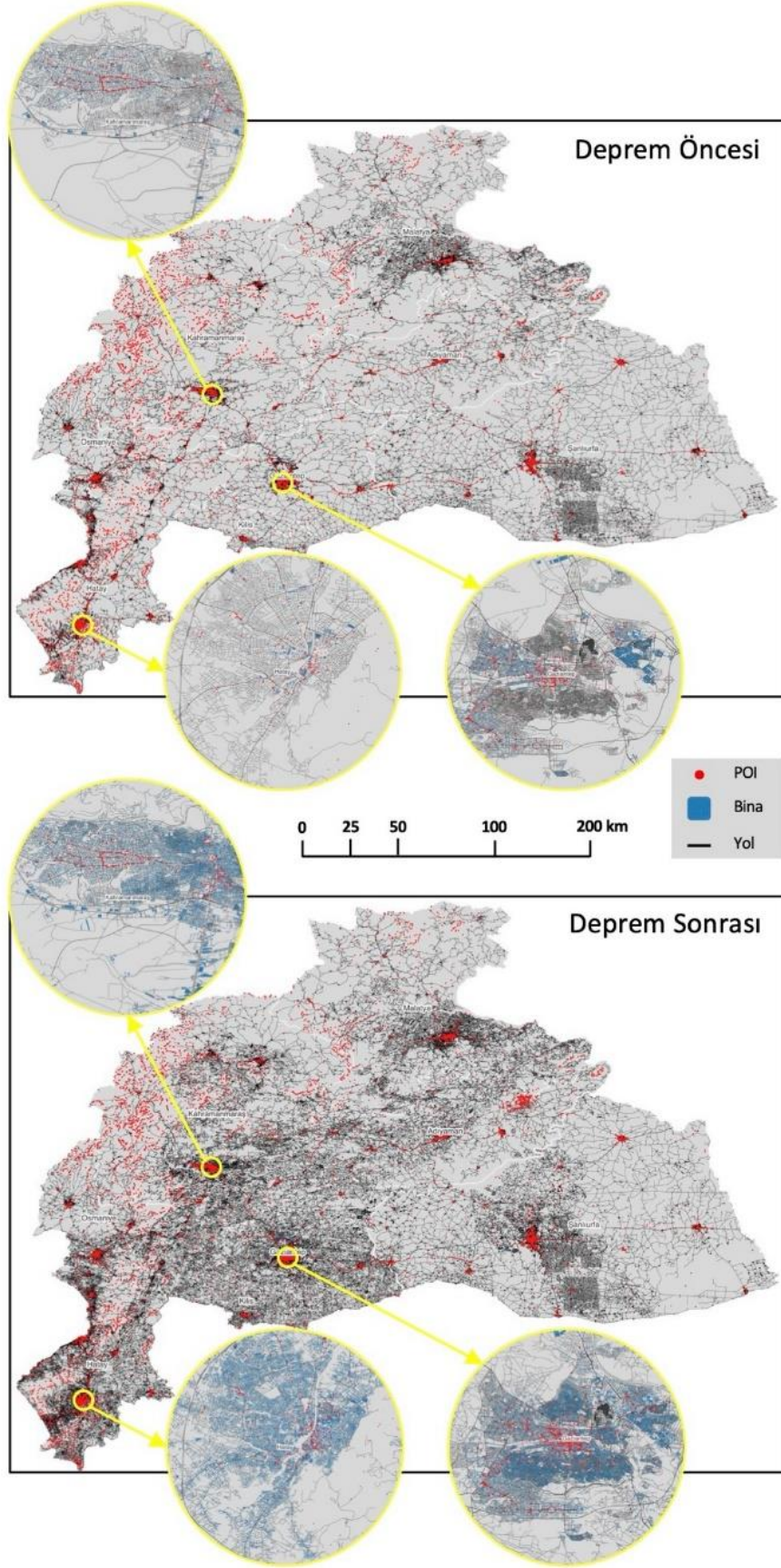
Anahtar	Sayı	Benzersiz Değer	Doluluk (%)
OsmId	2722	2722	100
İsim	2441	1909	89.7
Kaynak	2141	28	78.7
Kontrol_tarihi	2119	23	77.8
Tesis	1586	77	58.3
Telefon	1309	1067	48.1
Sağlık	1120	24	41.1
Mağaza	900	55	33.1
Doğal	167	7	6.1
Marka	166	74	6.1

İlgi noktalarındaki anahtarların ayrıntılı incelemesi için, 'kaynak' ve 'tesis' anahtarları seçilmiştir. 'Kontrol_tarihi' anahtarının yüksek doluluk oranına rağmen ayrıntılı incelemeye tabi tutulmasına gerek görülmemiştir (Tablo 6). 'Kaynak' anahtarına yönelik yapılan analizde, eklenen ilgi noktalarının yaklaşık %50'sinin (bu, kaynak bilgisi mevcut olan ilgi noktalarının %98'ini temsil eder) SafeGraph tarafından sağlandığı tespit edilmiştir. 'Tesis' anahtarının incelenmesinde ise, %21 oranında en fazla eczanelerin, ardından ibadethaneler, bankalar ve klinikler gibi diğer değerlerin yer aldığı belirlenmiştir.

Tablo 6. İlgi noktaları için en çok kullanılan anahtar değerlerine ait bazı istatistikler

Anahtar	Değer	Sayı	Doluluk (%)
Kaynak	SafeGraph	2108	49.6
	Microsoft/BuildingFootpr.	75	1.8
	Mapbox	28	0.7
	Maxar Premium	15	0.4
	Maxar	4	0.1
Tesis	Eczane	904	21.3
	İbadet_yeri	373	8.8
	Banka	286	6.7
	Klinik	233	5.5
	Okul	150	3.5
	Sığınak	94	2.2
	Hastane	86	2.0
	Otopark	83	2.0

OSM üzerinde, Kahramanmaraş depremleri sonrasında çalışma bölgesinde meydana gelen değişiklikleri ve gönüllülerin katkılarını sayısal olarak incelemek amacıyla Tablo 7 oluşturulmuştur. Bu tablo, deprem sonrası bölgeye eklenen bina sayısını, yol uzunluğunu ve ilgi noktası sayısını, Aralık 2023 itibarıyla Türkiye genelindeki verilerle karşılaştırmaktadır. Elde edilen verilere göre, deprem sonrası eklenen bina sayısı, Türkiye'deki toplam bina sayısının yaklaşık %32'sine denk gelmektedir. Bu durum, OSM veri tabanındaki her üç binadan birinin, Kahramanmaraş depremleri sonrası bu bölgeye eklendiğini göstermektedir. Bununla birlikte, deprem sonrası bölgeye eklenen yol verileri, Türkiye genelindeki yol uzunluğunun %6'sını, yeni ilgi noktası sayısı ise toplam verilerin %1'ini oluşturmaktadır. Bununla birlikte, Şekil 9, çalışma alanında



Şekil 9. Çalışma bölgesinin OSM platformundaki deprem öncesi ve sonrası durumu

OSM platformunda gerçekleşen değişiklikleri, deprem öncesi ve sonrası dönemlere ilişkin olarak genel bir bakış açısıyla sunmaktadır.

Tablo 7. Deprem sonrası eklenen nesnelerin tüm Türkiye verileriyle karşılaştırılması

Kategori	Deprem Sonrası Eklenen	Tüm Türkiye (Aralık 2023)	Oran (%)
Bina Sayısı	1326420	4159463	31.9
Yol Uzunluğu (km)	59354	1029408	5.8
İlgi Noktası Sayısı	2722	216212	1.3

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, 6 Şubat 2023'te gerçekleşen Kahramanmaraş depremi bağlamında, OSM platformu üzerinden elde edilen bina, yol ve ilgi noktaları gibi mekânsal veriler ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Deprem öncesindeki ve sonrasındaki altı aylık dönem boyunca bu veriler, niceliksel olarak analiz edilmiş ve ayrıntılı grafiklerle ortaya konarak öne çıkan kısımları yorumlanmıştır. Ayrıca, OSM'ye depremden sonra eklenen yeni nesnelerin semantik analiziyle mekânsal verilerin özneteliklerinin durumu ortaya konmuştur.

Bina sayılarındaki artış oranları incelendiğinde, Hatay'da meydana gelen yaklaşık 75 katlık artışın en yüksek düzeyde olduğu, Malatya'da ise yaklaşık 5 katlık artışın en düşük seviyede kaldığı gözlemlenmiştir. Bu farklılaşmanın, depremin daha ağır etkilediği şehirlerde HOT aktivitelerinin yoğunlaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, yol uzunluklarına ilişkin şehirler bazında yapılan analiz, benzer bir eğilimi ortaya koymaktadır; en yoğun katkının, depremin merkez üssüne yakın ve etkisinin daha şiddetli hissedildiği bölgelere yapıldığı anlaşılmaktadır.

Bina ve yol verileriyle oransal karşılaştırma yapıldığında, ilgi noktalarının en az artış gösteren kategori olduğu belirlenmiştir. Depremden önceki artış incelendiğinde depremden üç ay öncesinde ilgi noktalarına yönelik muhtemel başka bir insani haritacılık faaliyetinin izlerine rastlanmıştır.

Toplam ilgi noktalarının artış oranı göz önüne alındığında, sağlık tesislerinin sayısında dikkate değer bir artış meydana gelmiştir. İlgi noktaları ve özellikle sağlık tesislerindeki değişimin, bina sayısı ve yol uzunluklarına göre zamansal olarak incelenmesi, bu alanlarda istikrarın diğerlerine kıyasla daha geç sağlandığını göstermektedir. Bu bulgu, faaliyetlerin öncelikle bina ve yolların tamamlanmasına yoğunlaştığını ve ardından ilgi noktası ve sağlık tesisi gibi nesnelerin eklendiğini belirtir. Diğer yandan, park alanlarında incelenen diğer öğelere kıyasla daha az bir değişim gözlemlenmiştir. Bu, insani haritacılık faaliyetlerinde acil ihtiyaçları yansıtan önceliklerin belirlenmesinde önemli bir gösterge olarak değerlendirilebilir.

Depremden altı ay öncesine kıyasla, depremden altı ay sonrasındaki zamanda gönüllü sayısının önceki zamana göre %125 oranında artış gösterdiği göze çarpmaktadır. Bu artış, afet sonrasında gerçekleştirilen organizasyonların, normal

zamanlardaki OSM gönüllü sayısının artmasına olumlu bir etki yaptığı şeklinde yorumlanabilir.

İllere göre dağılım incelendiğinde, katılımcı faaliyet yoğunluğu yol uzunluğu değişimiyle büyük uyum gösterirken, bina sayılarıyla aynı oranda uyumlanmamaktadır. Bu durum, yol faaliyetlerine daha fazla gönüllünün katılım gösterdiği yönünde yorumlanabilir. Öte yandan, gönüllülerin tecrübe seviyelerinin niceliksel ve niteliksel farklılıklar yaratabileceği göz ardı edilmemelidir. Ayrıca, binaların %40'ının Microsoft kaynaklarından otomatik olarak eklenmiş olma ihtimali, bu istatistikler üzerinde önemli bir etki yaratabilir. Daha spesifik bir bakış açısıyla, Kahramanmaraş'taki gönüllü yoğunluğu Gaziantep'e göre çok daha az olmasına rağmen, bina sayısı ve yol uzunluğunda neredeyse benzerdir. Bu durum, deneyimli gönüllülerin, depreminin merkezi olması nedeniyle, Kahramanmaraş'ta daha etkili olmuş olabileceğini düşündürmektedir.

Deprem sonrası eklenen nesnelerin semantik analizine göre, %99'dan fazla binanın türü hakkında herhangi bir bilgi yer almadığı anlaşılmaktadır. Öte yandan eklenen yol türleri incelendiğinde büyük bir çoğunluğun (yaklaşık %80) patika ve yerleşim yolu gibi kategorilerde olduğunu göstermektedir. Bu durum ana yolların zaten OSM'de mevcut olmasıyla ilişkilendirilebilir. Bu durum Anderson vd. (2018) ve Ciepluch vd. (2011) [44] tarafından tespit edilen "OSM'de haritanın büyümesi genellikle yol ağı genişlemesiyle başlar, ardından yeni bina eklemeleri gelir ve mevcut nesnelerin düzenlenmesine odaklanan bir bakım aşamasıyla son bulur." tespitiyle açıklanabilir. Bununla birlikte, navigasyon ve harita üretim doğruluğu açısından kritik öneme sahip yol isimlerinin sadece %1 oranında doluluğa sahip olması yol ağının tanımlanmasında ve navigasyon sistemlerine doğru bilgi sağlanmasında olumsuz etkiler yaratabilir. Bu durum OSM verilerinin bu bölgede navigasyon amaçlı doğrudan kullanımını sınırlayabilir. İlgi noktalarının ise diğer bina ve yol nesnelere kıyasla daha az artış oranına sahip olmasına, daha ayrıntılı bilgiler içerdiği ve dolayısıyla daha yüksek bilgi yoğunluğuna sahip olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, ilgi noktaları birden çok kategori içerdiğinden doğrudan tespiti zordur. Bu bilgileri elde edebilmek amacıyla kapsamlı bir filtre uygulanmıştır. Ancak, farklı filtreler kullanıldığında ortaya çıkan farklı sayıların istatistikler üzerinde belirli bir etki yaratabileceği dikkate alınmalıdır.

Binaların %40'ının Microsoft, yol verilerinin %42'sinin Maxar ve eklenen ilgi noktalarının yaklaşık %50'sinin SafeGraph tarafından sağlandığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, gönüllülerin yanı sıra özel şirketlerin de bu süreçte veri paylaşımında önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Özellikle Maxar, depremden hemen sonra yayınladığı yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerini açık kaynaklı sunarak mekânsal analizlere ve OSM ekosistemine önemli katkıda bulunmuştur.

Araştırmanın sonuçlarına göre, deprem sonrası eklenen binalar Türkiye'deki toplam bina sayısının yaklaşık %32'sini, eklenen yol verileri toplam yol uzunluğunun %6'sını ve yeni ilgi noktaları ise toplam veri sayısının %1'ini

oluşturmaktadır. Bu veriler, özellikle bina sayısında, ülke genelindeki istatistikleri etkileyebilecek ölçüde önemli bir artış olduğunu göstermektedir. Bu durum, Herfort vd. (2021) [15] tarafından da tespit edilen HOT faaliyetlerinin ulusal ölçekteki OSM verileri üzerinde belirgin etkiler yaratabileceğinin altını çizmektedir.

Gerçekleştirilen analizin sonuçlarının resmi bir veri kaynağıyla kıyaslanması, resmi verilerin açıkça paylaşılması nedeniyle mümkün değildir. Ancak, deprem sonrası yayımlanan resmi raporlar, bölgedeki bina sayısının tamlığı hakkında fikir edinilmesine olanak tanır [18]. Bu kaynağa göre, çalışma alanındaki bina sayısı deprem öncesinde (2022) 1.818.188 olarak rapor edilmiştir. Gönüllüler tarafından deprem sonrası bölgeye eklenen bina sayısı ise 1.315.743 olarak belirlenmiştir. OSM'de önceden var olan binalar da dikkate alındığında, şu anda OSM veri tabanında çalışma bölgesinde yaklaşık 1,4 milyon bina bulunmaktadır. Fakat bölgede çok sayıda binanın yıkıldığı düşünülürse bu sayılardan bir oran elde etmek zordur.

Başka bir resmi rapora [45] göre, depremde sırasıyla yıkılan, acil yıkılacak, ağır hasarlı ve orta hasarlı bina sayıları 39.221, 21.047, 183.079 ve 36.174 olarak belirtilmiştir. OSM'ye deprem sonrası binaların genellikle afet sonrası elde edilen güncel uydu görüntülerine dayanarak eklendiği düşünüldüğünde, yıkılan binaların eklenmediği sonucuna varılabilir. Ancak, bu binalar arasında kaçının yıkılacak olan binalar olduğu doğrudan tespit edilememektedir. Bu durum, ayrı bir araştırma konusu olarak değerlendirilebilir. Bununla birlikte, eklenen binaların geometrik ve semantik açıdan doğruluğu ve kalitesi, ayrıntılı bir inceleme gerektirir ve bu konu üzerine ayrı bir çalışma yapılması gerekmektedir.

Afet sonrası dönemde, organizasyonlar, bireysel gönüllüler ve özel sektör kuruluşlarının OSM üzerindeki iş birliği, arama kurtarma ve yardım operasyonlarında hayati bir etki yaratmıştır. Bu durum, afet yönetiminde OSM'nin kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Ancak, bölgeye eklenen verilerin çeşitli uygulamalar için kullanımı, özellikle yol isimleri ve tek yönlülük gibi navigasyon bağlamında eksiklikler göz önünde bulundurulduğunda, daha ayrıntılı bir incelemeye ihtiyaç duymaktadır. Diğer yandan, güncel bina verilerinin, geometrik açıdan çeşitli uygulamalara önemli katkılarda bulunabileceği değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, OSM verilerinin afet yönetimindeki etkinliğini artıracak stratejilerin geliştirilmesi, gelecekteki çalışmalar için öncelikli bir alan olmalıdır.

Teşekkür

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 2219 programı (1059B192202917) kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %1

Kaynaklar

[1] A. Basaglia, A. Aprile, E. Spacone, and F. Pilla, Performance-based Seismic Risk Assessment of Urban

- Systems, *International Journal of Architectural Heritage*, 12, 7–8, 1131–1149, 2018. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1503371>
- [2] W. Habib, S. Mahmood, N. ul H. Huda, S. Noor, A. Saleem, M. Siraj, and H. Ahmad, A post earthquake damage assessment using GIS in district Mirpur, Pakistan, *Advanced GIS*, 3, 2, 53–58, 2023. [Online]. Available:<https://publish.mersin.edu.tr/index.php/agis/article/view/926>
- [3] E. Özyaydin, B. Amirgan, G. Taşkin, ve N. Musaoğlu, Derin öğrenme uygulamalarında kullanılan uzaktan algılama verilerinden oluşturulmuş açık kaynaklı bina veri setleri: Karşılaştırmalı değerlendirme, *Geomatik*, 2023. <https://doi.org/10.29128/geomatik.1257555>
- [4] M. Uzar and Z. Bayramoğlu, Performance analysis of rule-based classification and deep learning method for automatic road extraction, *International Journal of Engineering and Geosciences*, 8, 1, 83–97, 2023. <https://doi.org/10.26833/ijeg.1062250>
- [5] S. Voigt, T. Kemper, T. Riedlinger, R. Kiefl, K. Scholte, and H. Mehl, Satellite Image Analysis for Disaster and Crisis-Management Support, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45, 6, 1520–1528, 2007. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.895830>
- [6] M. F. Goodchild and J. A. Glennon, Crowdsourcing geographic information for disaster response: a research frontier, *International Journal of Digital Earth*, 3, 3, 231–241, 2010. <https://doi.org/10.1080/17538941003759255>
- [7] C. Barron, P. Neis, and A. Zipf, A Comprehensive Framework for Intrinsic OpenStreetMap Quality Analysis, *Transactions in GIS*, 18, 6, 877–895, 2013. <https://doi.org/10.1111/tgis.12073>
- [8] M. Eckle and J. Porto De Albuquerque, Quality Assessment of Remote Mapping for Disaster Management, in *Proceedings of the ISCRAM 2015 Conference*, Kristiansand, 2015.
- [9] P. Mooney, P. Corcoran, and A. C. Winstanley, Towards Quality Metrics for OpenStreetMap, in *ACM GIS*, San Jose, CA, USA, 2010, p. 566.
- [10] S. Buhur, N. Uluğtekin, M. Ü. Gümüşay, ve N. Musaoğlu, Turistik amaçlı mekânsal sanal ortamların oluşturulması: Tarihi Yarımada Örneği, *Geomatik*, 8, 2, 99–106, 2023. <https://doi.org/10.29128/geomatik.1133484>
- [11] D. Ma, M. Sandberg, and B. Jiang, Characterizing the Heterogeneity of the OpenStreetMap Data and Community, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4, 2, Art. 2, 2015. <https://doi.org/10.3390/ijgi4020535>
- [12] M. Hacı, A rule-based approach for generating urban footprint maps: from road network to urban footprint, *International Journal of Engineering and Geosciences*, 5, 2, 100–108, 2020. <https://doi.org/10.26833/ijeg.623592>
- [13] OSMF, OpenStreetMap Foundation. https://osmfoundation.org/wiki/Main_Page, Erişim Tarihi: 15 Ocak 2024.

- [14] MapBox, The OpenStreetMap data model. <https://labs.mapbox.com/mapping/osm-data-model/>, Erişim Tarihi: 21 Aralık 2023.
- [15] B. Herfort, S. Lautenbach, J. Porto de Albuquerque, J. Anderson, and A. Zipf, The evolution of humanitarian mapping within the OpenStreetMap community, *Scientific Reports*, 11, 1, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82404-z>
- [16] American University, Humanitarian Mapping. <https://subjectguides.library.american.edu/c.php?g=1300153&p=9552274>, Erişim Tarihi: 21 Aralık 2023.
- [17] HOT, What we do?, Humanitarian OpenStreetMap Team. <https://www.hotosm.org/what-we-do.html>, Erişim Tarihi: 15 Ocak 2024.
- [18] TC SBB, Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı, Strateji ve Bütçe Başkanlığı - 2023 Kahramanmaraş ve Hatay Depremleri Raporu, Erişim Tarihi: 2024-03-05, 2023. <https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2023/03/2023-Kahramanmaraş-ve-Hatay-Depremleri-Raporu.pdf>, Erişim Tarihi: 03 Ocak 2024.
- [19] J. Pechmann and C. de los Reyes, Using OSM Data in the Turkey and Syria Earthquake Response. <https://www.hotosm.org/updates/using-osm-data-for-the-turkey-and-syria-earthquake-response/>, Erişim Tarihi: 21, Aralık 2023.
- [20] H. Leson, S. Turksever, B. Kavlak, O. M. Yılmaz, and C. Unen, Open source maps and open data help humanitarian response. <https://opensource.com/article/23/3/open-source-open-data-humanitarian-response?fbclid=PAAaYOi7fKkmMN9paPXQMxicH3KdG6r0gp04O6vL4YJ34Ac6jyYU1NAhzMkI>, Erişim Tarihi: 21 Aralık 2023.
- [21] P. Zhao, T. Jia, K. Qin, J. Shan, and C. Jiao, Statistical analysis on the evolution of OpenStreetMap road networks in Beijing, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 420, 59–72, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2014.10.076>
- [22] M. Hacar, Analyzing the Behaviors of OpenStreetMap Volunteers in Mapping Building Polygons Using a Machine Learning Approach, *IJGI*, 11, 1, p. 70, 2022. <https://doi.org/10.3390/ijgi11010070>
- [23] A. G. Toprak, Dijital İletişim Çağında Mekânsal Bilginin Üretimi: Dijital Haritalar, Topluluklar ve Katılımcı Kültür, *İletişim Kuram ve Araştırma Dergisi*, 62, Art. 62, 2023. <https://doi.org/10.47998/ikad.1218329>
- [24] J. Mondzech and M. Sester, Quality Analysis of OpenStreetMap Data Based on Application Needs, *Cartographica*, 46, 2, Art. 2, 2011. <https://doi.org/10.3138/carto.46.2.115>
- [25] S. Çabuk, M. Erdoğan, ve E. Önal, Open Street Map Verilerinden Yararlanılarak 1 / 50 K Ölçekli Harita Üretilebilirliğinin Araştırılması, *Harita Dergisi*, 154, 26–34, 2015.
- [26] S. Sehra, J. Singh, and H. Rai, Assessing OpenStreetMap Data Using Intrinsic Quality Indicators: An Extension to the QGIS Processing Toolbox, *Future Internet*, 9, 2, p. 15, 2017. <https://doi.org/10.3390/fi9020015>
- [27] M. Basaraner, Geometric and semantic quality assessments of building features in OpenStreetMap for some areas of Istanbul, *Polish Cartographical Review*, 52, 3, 94–107, 2020. <https://doi.org/10.2478/pcr-2020-0010>
- [28] K. C. Küçük ve B. Anbaroğlu, OpenStreetMap Binalarının Mekânsal Doğruluğunun Analizi, *Türkiye Coğrafi Bilgi Sistemleri Dergisi*, 1, 1, 5–13, 2019.
- [29] F. Biljecki, Y. S. Chow, and K. Lee, Quality of crowdsourced geospatial building information: A global assessment of OpenStreetMap attributes, *Building and Environment*, 237, p. 110295, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110295>
- [30] M. Dittus, G. Quattrone, and L. Capra, Mass Participation During Emergency Response: Event-centric Crowdsourcing in Humanitarian Mapping, in *Proceedings of the 2017 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work and Social Computing*, 2017. <http://osm-analytics.org>
- [31] M. Auer et al., Towards Using the Potential of OpenStreetMap History for Disaster Activation Monitoring, in *Proceedings of the 15th ISCRAM Conference*, K. Boersma and B. Tomaszewski, Eds., NY, USA, 2018.
- [32] J. Anderson, R. Soden, B. Keegan, L. Palen, and K. M. Anderson, The Crowd is the Territory: Assessing Quality in Peer-Produced Spatial Data During Disasters, *International Journal of Human-Computer Interaction*, 34, 4, 295–310, 2018. <https://doi.org/10.1080/10447318.2018.1427828>
- [33] P. Campalani, M. Pittore, and K. Renner, Assessing OpenStreetMap roads fitness-for-use for disaster risk assessment in developing countries: The case of Burundi, *Open Geosciences*, 15, 1, 20220485, 2023. <https://doi.org/10.1515/geo-2022-0485>
- [34] K. Tzavella, A. Skopeliti, and A. Fekete, Volunteered geographic information use in crisis, emergency and disaster management: a scoping review and a web atlas, *Geo-spatial Information Science*, 27, 2, 423–454, 2022. <https://doi.org/10.1080/10095020.2022.2139642>
- [35] S. Suthakaran, S. Jayakody, S. Subasinghe, N. Seneviratne, and R. Alahakoon, Mapping the flood risk exposure using open-source geospatial tools and techniques: A case of Gampaha Divisional Secretariat Division, Sri Lanka, *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 10, 18–31, 2022. <https://doi.org/10.4236/gep.2022.1010002>
- [36] P. Mooney and P. Corcoran, Analysis of Interaction and Co-editing Patterns amongst OpenStreetMap Contributors, *Transactions in GIS*, 18, 5, Art. 5, 2013. <https://doi.org/10.1111/tgis.12051>
- [37] M. Hacar, B. Kılıç, and K. Şahbaz, Analyzing OpenStreetMap Road Data and Characterizing the Behavior of Contributors in Ankara, Turkey, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7, 10, p. 400, 2018. <https://doi.org/10.3390/ijgi7100400>
- [38] M. Zia, Z. Cakir, and D. Z. Seker, Turkey

- OpenStreetMap Dataset - Spatial Analysis of Development and Growth Proxies, *Open Geosciences*, 11, 1, Art. 1, 2019. <https://doi.org/10.1515/geo-2019-0012>
- [39] M. Hacı, OpenStreetMap Yerleşim-içi Yollarına Ait Etiket Bilgilerinin Karşılaştırılmasıyla Gönüllülerin Katkı Sağlama Eğilimlerinin İncelenmesi, *Harita Dergisi*, 164, 77–87, 2020.
- [40] M. Minghini and F. Frassinelli, OpenStreetMap history for intrinsic quality assessment: Is OSM up-to-date?, *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 4, 1, 2019. <https://doi.org/10.1186/s40965-019-0067-x>
- [41] A. Martini, P. V. Kuper, and M. Breunig, Database-Supported Change Analysis and Quality Evaluation of Openstreetmap Data, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-2/W5, 535–541, 2019. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-535-2019>
- [42] ohsome, ohsome Heidelberg Institute for Geoinformation Technology. <https://heigit.org/big-spatial-data-analytics-en/ohsome/>, Erişim Tarihi: 04 Mart 2024.
- [43] ohsome API, Welcome to the documentation of the ohsome API! — ohsome API 1.10.2 documentation. <https://docs.ohsome.org/ohsome-api/v1/>, Erişim Tarihi: 04 Mart 2024.
- [44] B. Ciepluch, P. Mooney, and A. C. Winstanley, Building Generic Quality Indicators for OpenStreetMap, in 19th annual GIS Research UK (GISRUK), Portsmouth, UK, Apr. 2011. Erişim Tarihi: 05 Aralık 2024. <http://www.port.ac.uk/special/gisruk2011/>
- [45] TC SBB, Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı, Strateji ve Bütçe Başkanlığı - Kahramanmaraş ve Hatay Depremleri Yeniden İmar ve Gelisme Raporu, Erişim Tarihi: 2024-03-05, 2024. <https://www.sbb.gov.tr/wpcontent/uploads/2024/02/Kahramanmaraş-ve-Hatay-Depremleri-Yeniden-İmar-ve-Gelisme-Raporu-1.pdf>, Erişim Tarihi: 05 Mart 2024.





Groundwater level estimation with analytical hierarchy method

Analitik hiyerarşi yöntemi ile yeraltı suyu seviyesi tahmini

Burak Gül^{1,*}, Mehmet Hayrullah Akyıldız²

^{1,2} Dicle University, Civil Engineering Department, 21280, Diyarbakır, Türkiye

Abstract

Groundwater is an important component of the hydrological cycle and a critical resource for ecosystems and human life on Earth. Estimating groundwater levels is important for strategic planning and management in many areas such as agriculture, industry, engineering studies, and drinking water. In particular, it is necessary to determine the groundwater accurately and clearly to carry out both ground and hydraulic works. In this study, the estimation of the groundwater level of Diyarbakır province was made by analytical hierarchy method. Groundwater level estimation was made using slope, geology, geomorphology, land use, precipitation, fault density, drainage density classes. Especially in areas where data supply is short, positive and accurate results can be obtained with AHP, which is a fast and practical application. It is expected that the findings obtained will benefit public and private institutions and organizations for future studies.

Keywords: Analytical hierarchy method, Diyarbakır, Geographic information systems, Groundwater

1 Introduction

Groundwater is a valuable natural resource that has a critical role in the life cycle of our planet. Although these deep-water layers are not visibly accessible like surface waters, they are vital for environmental balance and human life. The importance of groundwater is affecting a wide range of areas, from agricultural irrigation to industrial production, to drinking water health to ecosystem balancing. In addition, under increasing pressure from factors such as climate change and human activities, the sustainable use and protection of this substrate water resource is becoming increasingly critical. Groundwater is an issue that needs to be examined for engineering structures to be built, especially in terms of soil engineers.

Due to this situation, many studies have been carried out on issues such as estimating and observing the groundwater level [1-9]. There are many different scientific methods and studies available for estimating groundwater. These include techniques such as hydrogeological investigations, geophysical methods, mathematical modeling, and remote sensing. Hydrogeological investigations are a widely used method of determining groundwater levels and fluid properties. These investigations often include field studies and include drilling and well studies to assess the

Özet

Yeraltı suyu, hidrolojik döngünün önemli bir bileşenidir ve Dünya'daki ekosistemler ve insan yaşamı için kritik bir kaynaktır. Yeraltı suyu seviyelerinin tahmini, tarım, sanayi, mühendislik çalışmaları ve içme suyu gibi birçok alanda stratejik planlama ve yönetim için önemlidir. Özellikle hem zemin hem de hidrolik işlerin yapılabilmesi için yeraltı suyunun doğru ve net bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada Diyarbakır ilinin yeraltı suyu seviyesinin tahmini analitik hiyerarşi yöntemi ile yapılmıştır. Eğim, jeoloji, jeomorfoloji, arazi kullanımı, yağış, fay yoğunluğu, drenaj yoğunluk sınıfları kullanılarak yeraltı suyu seviyesi tahmini yapılmıştır. Özellikle veri tedarikinin kısa olduğu alanlarda hızlı ve pratik bir uygulama olan AHP ile olumlu ve doğru sonuçlar alınabilmektedir. Elde edilen bulguların ileride yapılacak çalışmalar için kamu ve özel kurum ve kuruluşlara fayda sağlaması beklenmektedir.

Anahtar kelimeler: Analitik hiyerarşi yöntemi, Coğrafi bilgi sistemleri, Diyarbakır, Yeraltı suları

characteristics of groundwater layers, such as depth, quality, and direction of flow.

Geophysical methods are a set of techniques used in the imaging and characterization of groundwater layers. Techniques such as electrical resistivity tomography, magnetotelluric methods, and gravity measurements are used to map areas where groundwater is present and understand its properties.

Mathematical modeling is another important tool used to understand the complex relationships of groundwater flow and storage. These models can help predict future water levels by taking into account various variables of groundwater movement [10-13].

Remote sensing methods are also increasingly used in estimating groundwater. Technologies such as satellite imagery and weather radar can be used to monitor groundwater resources and identify changes. The groundwater level is of great importance for soil mechanics and hydraulics departments because it is a basic parameter that affects the hydraulic and mechanical behavior of the soil. In terms of Soil Mechanics, groundwater level has a significant impact on the bearing capacity, compressibility and stability of the soil. When the level of groundwater is high, the bearing capacity of the ground can decrease, which can increase the load on the foundations of structures. In

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: brkg121@gmail.com (B. Gül)

Geliş / Received: 11.06.2024 Kabul / Accepted: 15.08.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1499537

addition, factors such as the compressibility of the ground and capillary water effects are also factors that should be taken into account in determining the groundwater level [14-18].

Static and dynamic groundwater levels are concepts that evaluate the state of groundwater at a given time from different perspectives.

Static Groundwater Level: It is the term used to determine the water level at a given time. Generally, their levels are determined by means of observation wells, radar, acoustic and ultrasonic measuring devices. This level indicates how close or far groundwater is to the surface at a given moment. Static groundwater level refers to the state when the water table is stable [19-20].

Dynamic Groundwater Level: It refers to the change of groundwater over time. Fluctuations in groundwater level may occur as a result of groundwater being affected by factors such as precipitation, irrigation, runoff, drainage or human interventions. Therefore, dynamic groundwater level refers to the changes that occur in the level of groundwater over a period of time. These changes provide information about the regime and cycle of groundwater and play an important role in applications such as irrigation, agriculture, and well productivity [21-22].

From a hydraulic point of view, the groundwater level is a determining factor in the permeability and hydraulic conductivity of the ground. The groundwater level affects the flow and drainage of water within the ground. High groundwater levels can disrupt the drainage of the ground and cause water to rise towards the surface, which can weaken the foundations of structures and increase ground erosion. In addition, if the groundwater level is low, problems may arise, such as drying out and cracking of the floor. For these reasons, groundwater level is of great importance in terms of civil engineering.

In this context, in this study, the groundwater level of Diyarbakır province was estimated by means of the analytical hierarchy method. Groundwater level estimation and mapping were made and mapped using slope, geology, geomorphology, land use, precipitation, fault density, drainage density classes. AHP is an important method to fill the gap in boreholes, especially in the provision of observation data and the difficulties in obtaining observation data. The data obtained is aimed to help public, private institutions and readership.

2 Workspace

Diyarbakır province was chosen as the study area (Figure 1). The population of Diyarbakır is 1 million 873 thousand people. Its altitude is 675 m. It has a total of 17 districts. Diyarbakır has hot and dry summers and cold winters and often snow. The average annual rainfall in Diyarbakır is around 500 mm, and precipitation is largely concentrated in winter and spring. The summer months are quite dry, and the amount of precipitation is minimal during this period. The prevailing winds in the region generally blow from the north and northwest, and wind speeds can vary seasonally. In the study, the analysis of all districts in the ArcGIS program was not included in the analysis of Kulp, Lice, Silvan and Çermik

districts due to the lack of software and hardware of the computer.

The groundwater resources around Diyarbakır are in the form of two separate aquifer systems: the upper basalt aquifer and the deeper limestone aquifer (approximately 300 m deep). The thickness of the upper basalt aquifer varies between 0 and 60 m on average. The natural drainage systems of the groundwater in Diyarbakır are different for basalt and limestone aquifers. The drainage area of the basalt aquifer covers the area from the summit of Karacadağ to the Tigris Valley. The drainage area of the limestone aquifer includes the Silvan-Midyat Formation, which spreads from approximately 30–35 km north of Diyarbakır, and the Midyat Formation, which spreads from 25–30 km south of Diyarbakır. While the groundwater levels around the Tigris River are 1 meter in the upper and lower parts of the river, this depth increases to 55 meters as the altitude increases. In some places, especially in local areas, this depth can exceed 100 meters. In the plain regions, static water levels vary between 2 and 55 meters. Dynamic water levels of the region vary between 11 and 69 meters in basalt fields, alluvial beds of the Tigris River and Silvan Plain, and between 90 and 114 meters in Çınar Ortataş, Kazıktepe and Kavsan regions. In the north of Diyarbakır, water levels vary between 90 and 269 meters in the triangular region between Ergani, Eğil and Kocaköy [23].

3 Material and methods

3.1 Analytic hierarchy method

The Analytical Hierarchy Process (AHP) is a multi-criteria decision-making approach designed to handle the complexities of decision-making. It is employed to assess various criteria and alternatives based on those criteria. The primary aim of AHP is to simplify the decision-making process and help in selecting the most suitable option. The steps involved in the AHP method are outlined as follows:

1. In a stage where objectives and content are precisely defined, the order of precedence among the parameters to be used is clearly established. Subsequently, comparison matrices are created in pairs. Parameters are rated based on their degree of importance, with scores ranging from 1-9 and 1/2-1/9. These matrices are organized in the form of square matrices with diagonals of 1.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} = 1/a_{12} & 1 & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} = 1/a_{1n} & a_{n2} = 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

In this equation a_{ij} , is the value of the comparison of criterion I and criterion J relative to each other, a_{ji} , its value corresponds to the value of $1/a_{ij}$.

2. In this phase, each matrix element is normalized by dividing it by the total of its respective column. As a result, the sum of each normalized column Equation (1) and Equation (2).

$$a'_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

3. The average of the row sums for each normalized matrix is calculated by dividing by the matrix size. The resulting values represent the importance weights of each parameter. These weights constitute the priority vector. (Equation (3)).

$$w_i = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n a'_{ij}, \quad (3)$$

Percentage distributions are derived using Equation (3), which illustrates the relative importance of the parameters with respect to one another.

4. At this stage, it is essential to determine the consistency ratio of the comparison matrix. This involves calculating a value known as the Consistency Index (CI) (Equation (4), Equation (5)).

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sum_{i=1}^n a_{ij} w_j}{w_i} \right) \quad (5)$$

Once the CI and RI values are determined, the consistency ratio is computed using Equation (6). To assess the consistency achieved, it is necessary to have the Random Index (RI) value.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

If the result from Equation (6) is below 0.10, the comparison matrix is considered to be acceptable.

5. To prioritize decision options, a matrix is constructed by comparing the criteria with each other. This matrix can also be described as the weight vector for each criterion. [24].



Figure 1. Study area location map

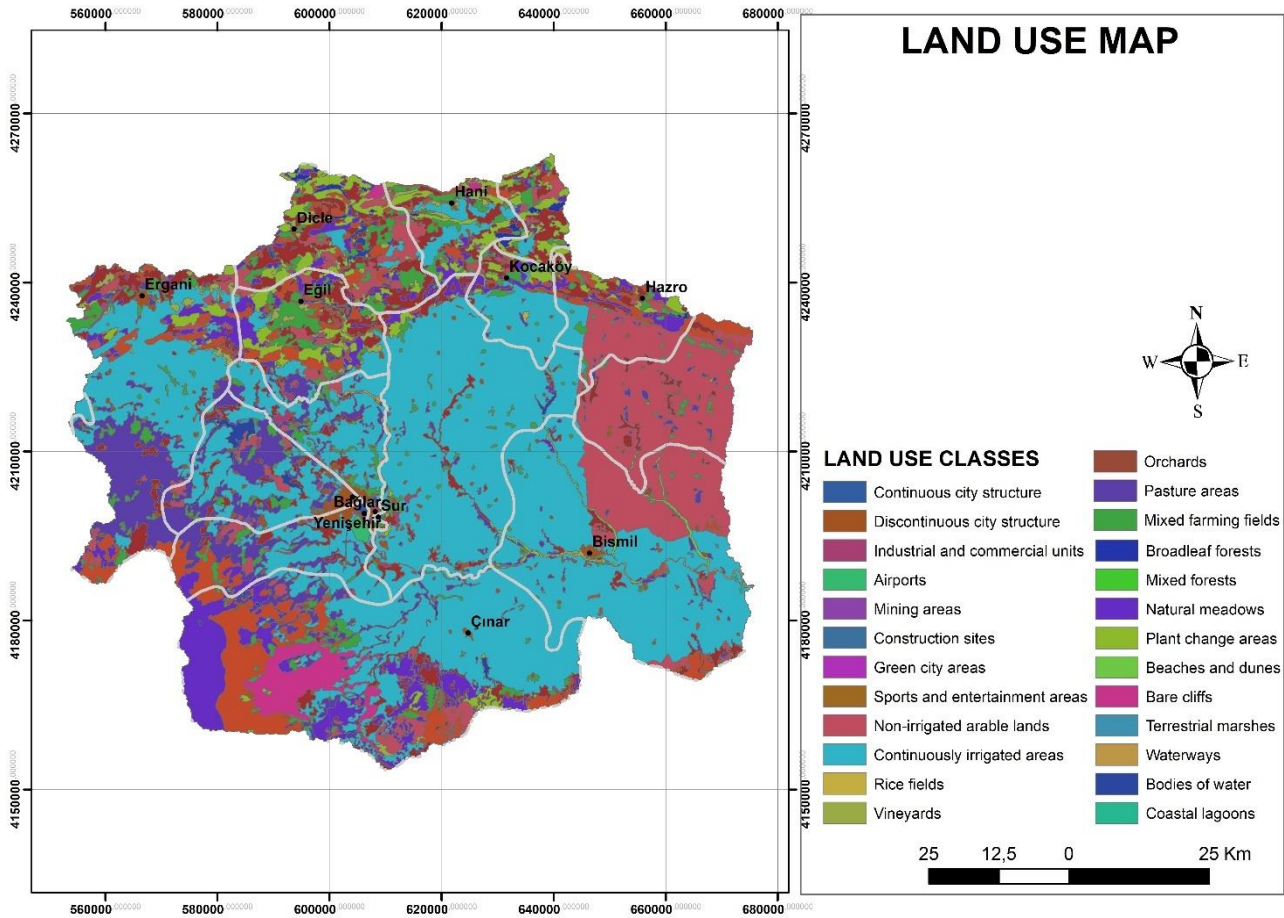


Figure 2. Land use classes

The land classes shown in Figure 2 are classified as (1) urban areas and commercial units, (2) non-irrigated arable areas, (3) continuously irrigated areas, (4) pasture areas, (5) forest areas, (6) bare cliffs, (7) water structures, as seen in Table 1. Land use classes play an important role in the groundwater level. If the general interpretation of these classes is to be made, construction and infrastructure activities in urban areas and commercial units affect the groundwater level, while agricultural practices play a role in non-irrigated arable areas as well as natural factors. Irrigation systems in continuously irrigated areas, and

grazing and irrigation in pasture areas, affect the groundwater level. While the root systems of vegetation in forests balance groundwater, forestry practices can adversely affect. Bare cliffs have little potential to affect groundwater levels, but natural water sources can be found here. Water structures directly affect the groundwater level; Dams increase water by accumulating it, while wells can reduce it by drawing it.

Figure 3 shows the drainage density map, and Table 2 shows the comparison matrix.

Table 1. Land use classes comparison matrix

Land use classes	1	2	3	4	5	6	7	Weight Coefficients	Consistency check	
1	1	3	1/2	2	2	4	1/3	0.147	14.70%	Consistency OK
2	1/3	1	1/5	1/2	1/3	2	1/6	0.05	5.00%	3%
3	2	5	1	3	2	5	1/2	0.221	22.10%	
4	1/2	2	1/3	1	1/2	3	1/4	0.083	8.30%	
5	1/2	3	1/2	2	1	3	1/4	0.113	11.30%	
6	1/4	1/2	1/5	1/3	1/3	1	1/6	0.038	3.80%	
7	3	6	2	4	4	6	1	0.349	34.90%	

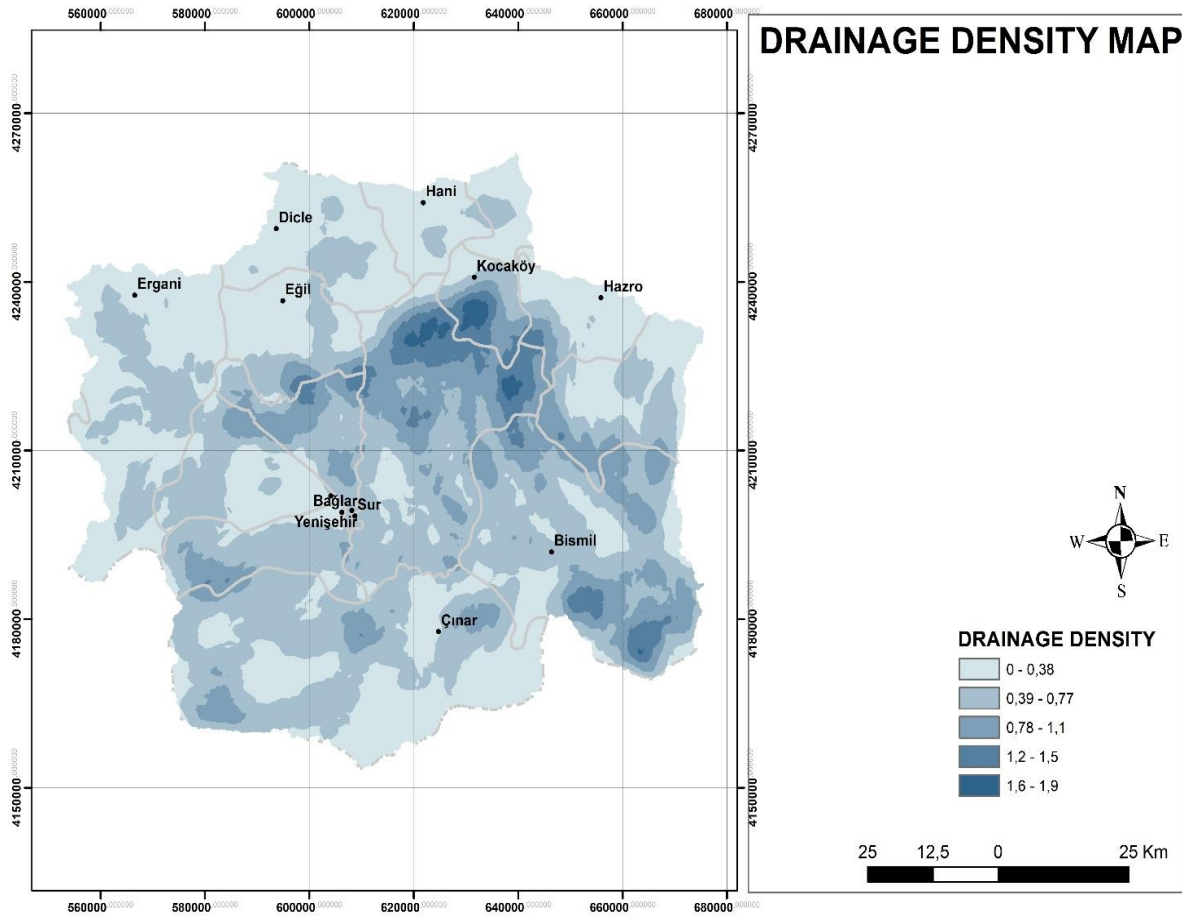


Figure 3. Drainage density map

In Table 2, (1) corresponds to the range of 0-0.38, (2) to the range of 0.39-0.77, (3) to the range of 0.78-1.1, (4) to the range of 1.2-1.5 and (5) to the range of 1.6-1.9. The effect of drainage density on groundwater level is a complex hydrological process and is influenced by a variety of factors. The effect of drainage density on groundwater level occurs primarily through hydraulic connections. In the case of the presence of permeable materials such as sand or gravel between stream beds and groundwater layers, it is possible for stream water to penetrate into groundwater layers and increase the amount of water in these layers. However, excessive water withdrawal or human influence on streams can cause groundwater to decrease or decrease. In particular,

human activities such as large-scale dam constructions or agricultural irrigation can increase the impact of drainage density on groundwater levels. In this classification, it was made by taking into account the situation where the groundwater level may be high in places where the drainage network is dense.

Figure 4 shows the slope map, and Table 3 shows the comparison matrix of the slope. In the matrix, it represents (1) >25%, (2) 15-24%, (3) 8.1-14%, (4) 4.1-8%, (5) 0-4%. In low-sloping areas, soil water flows more slowly and can seep into underground water tables.

Table 2. Drainage density comparison matrix

Drainage Density	1	2	3	4	5	Weight coefficients	Consistency check
1	1	1/3	1/4	1/5	1/6	0.048	4.80%
2	3	1	1/3	1/4	1/5	0.086	8.60%
3	4	3	1	1/3	1/4	0.152	15.20%
4	5	4	3	1	1/2	0.283	28.30%
5	6	5	4	2	1	0.432	43.20%

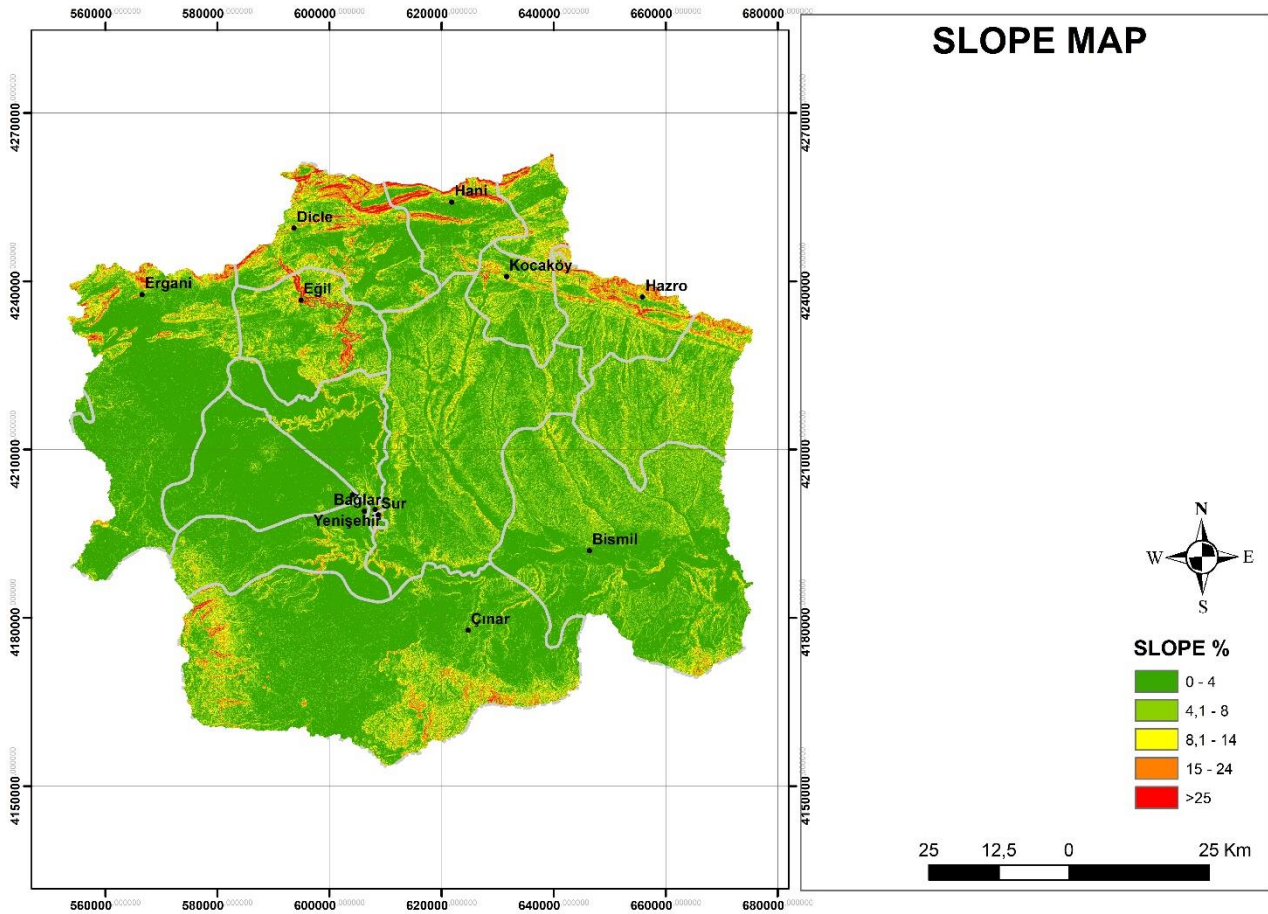


Figure 4. Slope map

This can contribute to the accumulation of rainwater and the rise of the groundwater level. Low-sloping terrains often allow more water to accumulate and remain in the soil, which increases the supply of groundwater layers. On the other hand, in areas with high slopes, the flow of water can be faster and rainwater can move downstream quickly without accumulating on the surface. In this case, water can seep less into the groundwater tables, and the groundwater level can often be lower. In areas with high slopes, groundwater layers may be fed with less water, and the groundwater level may be low at times. In this direction, a matrix has been created in such a way that the groundwater level is higher where the slope is low, and the groundwater level is lower where there is a lot.

Figure 5 shows the fault intensity map, and Table 4 shows the comparison matrix. In the matrix, it represents the classes (1) 0-0.022, (2) 0.023-0.068, (3) 0.069-0.13, (4) 0.14-0.2, (5) 0.21-0.29. Fault lines are fragile regions of the earth's crust and are often the areas where earthquakes occur. The impact of fault lines on groundwater levels varies depending on a variety of factors. Fractures in areas where fault lines are located can cause water leakage, and these leaks can increase or decrease the groundwater level. In addition, ruptures in fault lines can lead to changes in the groundwater regime; In some cases, they can impede or divert the movement of water.

Table 3. Slope comparison matrix

Slope %	1	2	3	4	5	Weight coefficients		Consistency check
1	1	1/3	1/5	1/7	1/9	0.035	3.50%	Consistency OK
2	3	1	1/3	1/4	1/7	0.071	7.10%	8%
3	5	3	1	1/3	1/5	0.137	13.70%	
4	7	4	3	1	1/3	0.251	25.10%	
5	9	7	5	3	1	0.507	50.70%	

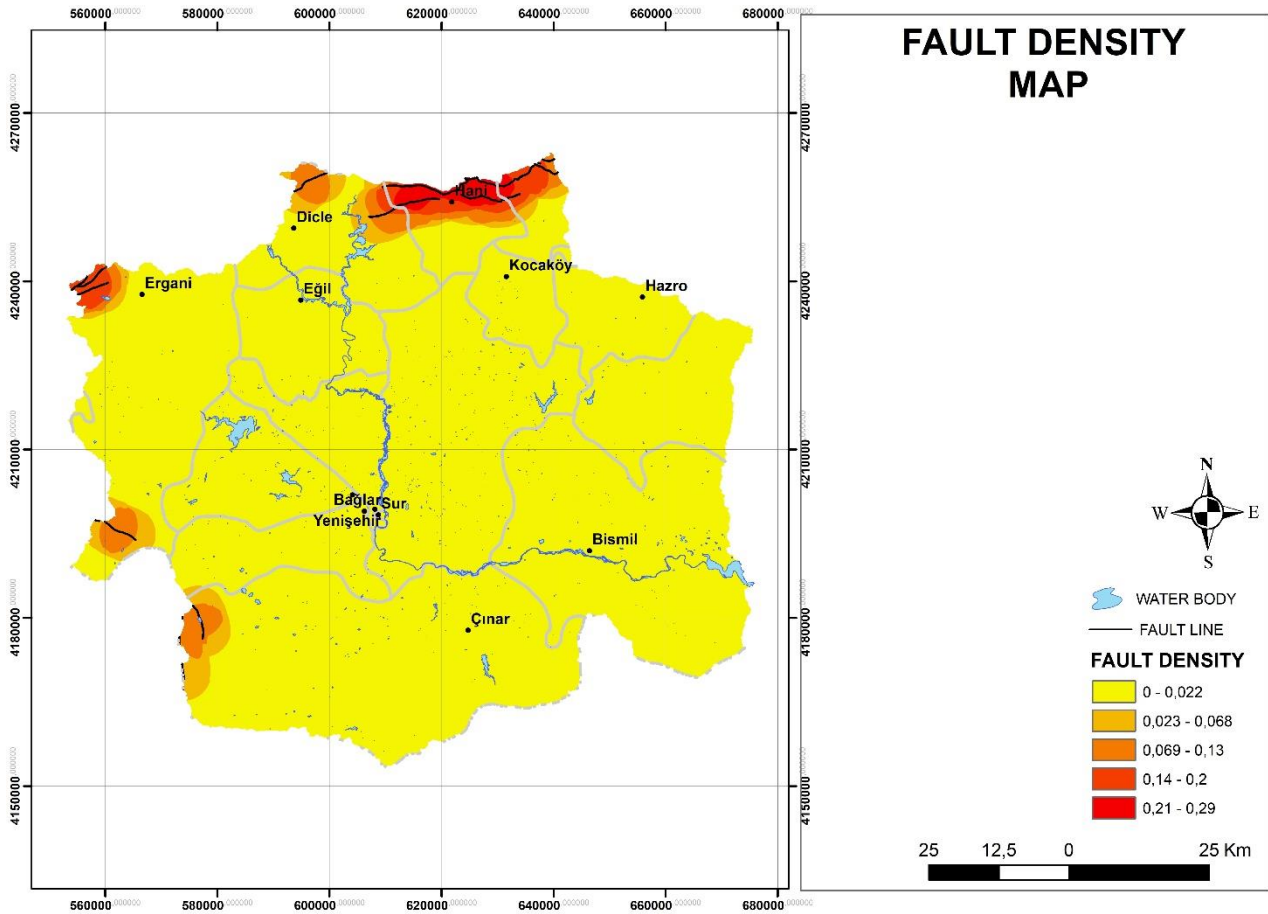


Figure 5. Fault intensity map

This, in turn, can cause groundwater to accumulate or flow in certain areas. Fault lines can also affect the flow of surface water. Fractures along fault lines can alter the flow of surface water, which can affect the groundwater level. In addition, earthquakes along fault lines can cause temporary changes in the level of groundwater. However, these effects are usually short-lived and do not cause long-term groundwater level changes. The effects of fault lines on groundwater levels vary depending on the location of the fault, its size and environmental conditions. In the matrix, a classification is made according to the situation where the groundwater level may be higher in areas close to the fault.

Figure 6 shows the geology map, and Table 5 shows the comparison matrix. The effect of geological classes on groundwater level depends mainly on the degree of porosity, permeability and consolidation of rocks. Sedimentary rocks are generally of sedimentary origin and are permeable.

Therefore, in sedimentary formations, groundwater is usually high and the movement of water can be rapid. On the other hand, ultrabasic rocks are tightly consolidated and generally impermeable, which limits the movement of groundwater and can lower the groundwater level. Unconsolidated and semi-consolidated formations, usually composed of sedimentary or volcanic rocks, they are permeable, which allows the movement of groundwater and generally keeps the groundwater level high. Finally, basic rocks also often have a tightly consolidated impermeable structure, which can restrict the movement of groundwater and lower the groundwater level. Therefore, the effect of geological classes on groundwater level varies depending on the basic properties of rocks and plays an important role in determining the movement of water and the groundwater level.

Table 4. Fault intensity comparison matrix

Fault intensity	1	2	3	4	5	Weight coefficients	Consistency check
1	1	1/2	1/3	1/4	1/5	0.059	5.90%
2	2	1	1/3	1/4	1/5	0.08	8.00%
3	3	3	1	1/3	1/4	0.147	14.70%
4	4	4	3	1	1/3	0.257	25.70%
5	5	5	4	3	1	0.458	45.80%

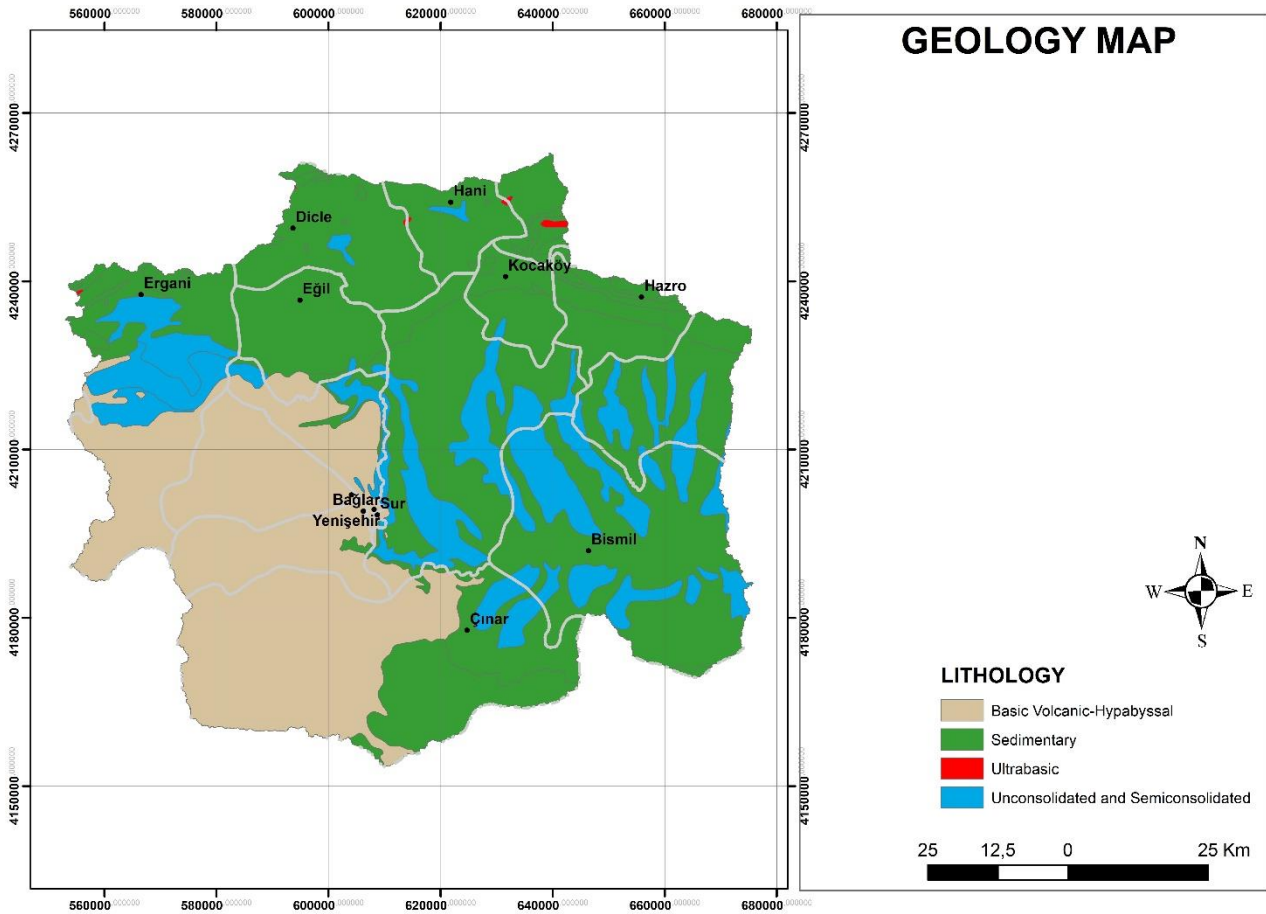


Figure 6. Geology map

If information is given about the underground geology of the Diyarbakır region, the basalt aquifers covering the surface of the region consist of volcanic origin units formed in the Pliocene and Quaternary periods and show a widespread. While the average thickness of these aquifers varies between 20 and 60 meters, they contain important groundwater resources thanks to their high water permeability. Limestone aquifers found at depths are generally Mesozoic-aged formations and are found at a depth of about 300 meters. These limestone formations have high porosity and permeability and are of great importance in terms of groundwater storage capacity; It also shows karst features. Alluvial and sedimentary layers in river valleys and lowland areas, on the other hand, affect surface water flows and drainage systems; These layers are usually in the form of fine-grained sedimentary deposits and are especially observed in lowland regions.

The geomorphology map is given in Figure 7 and the comparison matrix is given in Table 6. Regions with geomorphological characteristics such as valleys, plateaus, hills and mountainous areas have different factors that affect the groundwater level. Valleys are usually areas where water accumulates and the groundwater level is high. Valleys, where surface water is easily collected and percolated underground, can contribute to groundwater replenishment and therefore an increase in groundwater level. For this reason, valleys are generally known as areas where groundwater resources are located and water is easily accessible. Plateaus are high plains that are flat or gently sloped. The groundwater level in these areas is generally lower compared to the valleys. Because plateaus are usually made up of compacted rocks that block the flow of surface water and restrict the infiltration of water underground.

Table 5. Lithology comparison matrix

	Sedimentary	Ultrabasic	Unconsolidated and semi-consolidated	Basic	Weight coefficients	Consistency check
Sedimentary	1	7	1/3	3	0.287 28.70%	Consistency OK
Ultrabasic	1/7	1	1/7	1/2	0.057 5.70%	6%
Unconsolidated and semi-consolidated	3	7	1	5	0.551 55.10%	
Basic	1/3	2	1/5	1	0.104 10.40%	

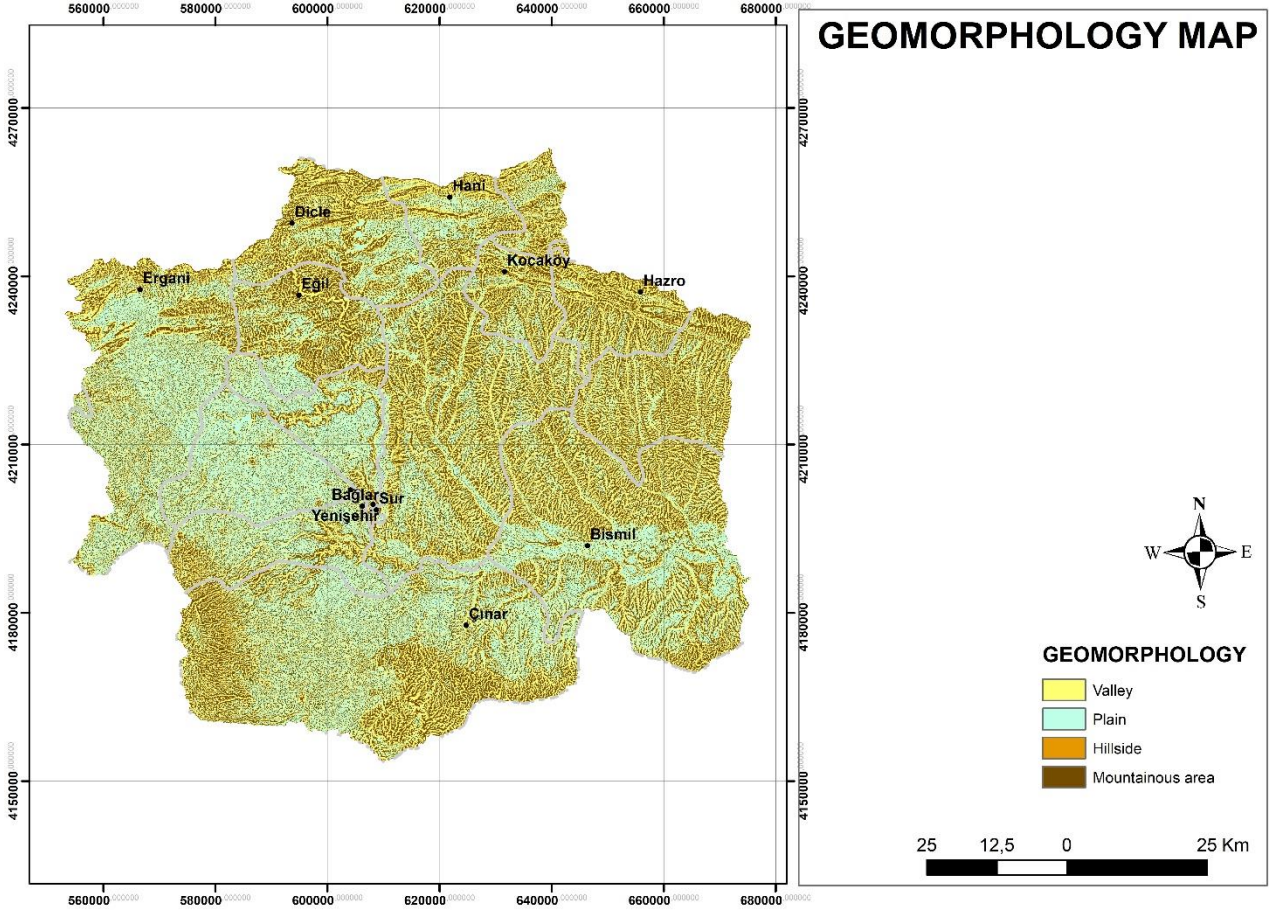


Figure 7. Geomorphology map

Thus, plateaus can often be more constrained in terms of groundwater resources. Hill and mountainous areas have topographically varied slopes and elevations. The groundwater level in these areas can vary depending on geological features, the amount of precipitation, and other factors that affect the flow of groundwater. In some cases, rocks in hill and mountainous areas can be porous and permeable, allowing the movement of groundwater and increasing the groundwater level. However, in other cases, the rocks may be more tightly consolidated and restrict the movement of groundwater, which can lead to a decrease in the groundwater level.

A precipitation map is given in Figure 8 and a comparison matrix is given in Table 7, and a classification is made according to the decrease in precipitation towards 5.sn, with the 1st class being the highest rainfall class.

Precipitation is an important factor determining the groundwater level and directly affects the groundwater regime. The amount and distribution of precipitation determine the feeding and replenishment of groundwater layers. In areas with heavy and regular rainfall, surface water percolates under the ground and feeds the groundwater layers, which can lead to an increase in the groundwater level. However, in areas where rainfall is low or irregular, the groundwater layers are not adequately nourished and the groundwater level decreases. In addition, the amount of precipitation affects the rate of refilling of groundwater. Heavy rainfall rapidly replenishes groundwater layers and raises the groundwater level, while during prolonged dry periods, the groundwater level decreases.

Table 6. Geomorphology comparison matrix

	Valley	Plain	Hill	Mountainous	Weight coefficients	Consistency check
Valley	1	1/2	5	7	0.364	36.40%
Plain	2	1	4	6	0.465	46.50%
Hill	1/5	1/4	1	3	0.116	11.60%
Mountainous	1/7	1/6	1/3	1	0.055	5.50%

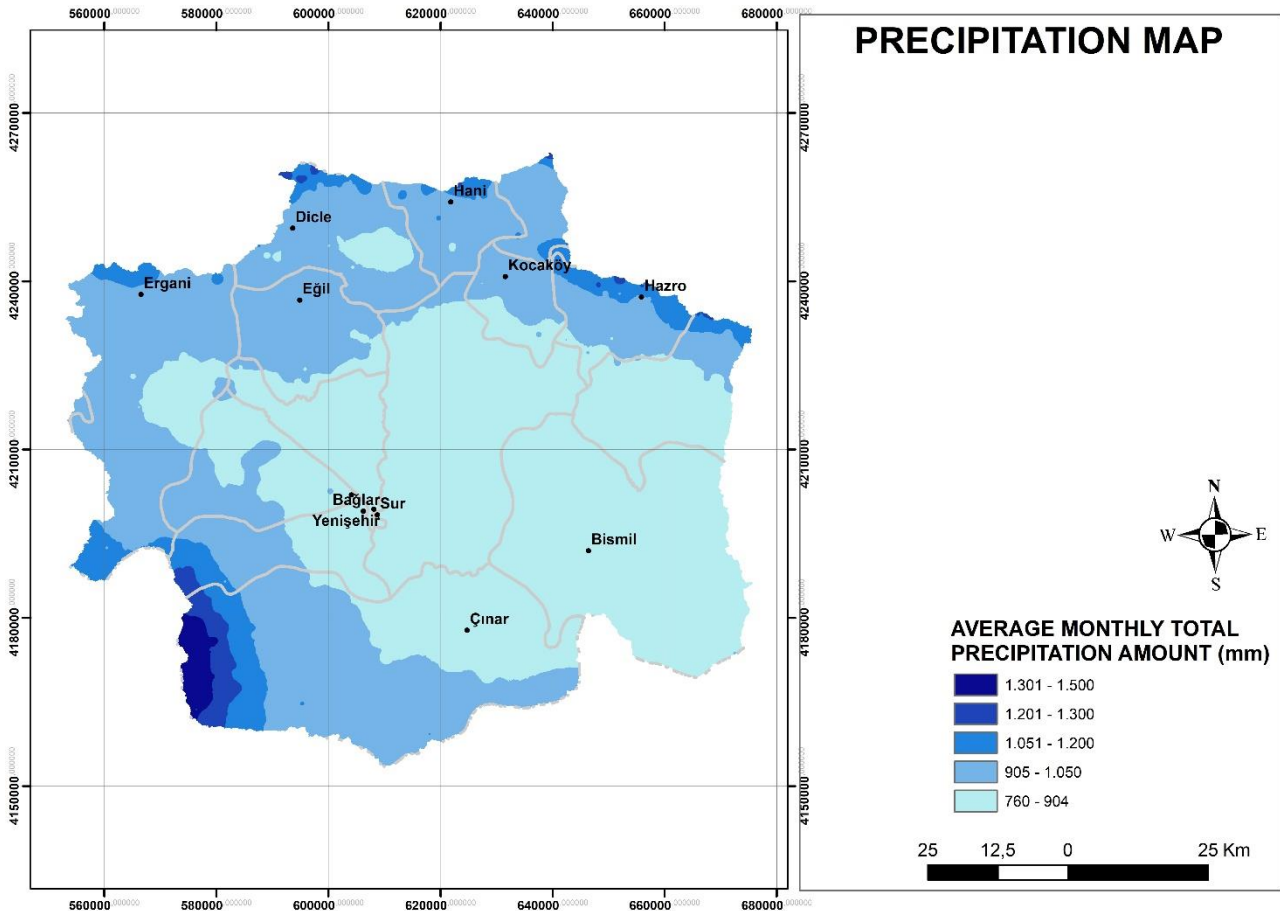


Figure 8. Precipitation map

However, the amount and distribution of precipitation can also determine seasonal fluctuations of groundwater level. The groundwater level usually rises, especially during the rainy seasons, while it decreases during the dry seasons. However, excessive rainfall can also adversely affect the groundwater level. Excessive rainfall can cause soil erosion, leading to erosion and contamination of groundwater layers. In this case, the groundwater level may decrease or its quality may deteriorate.

Figure 8 shows the groundwater level map, and Table 8 shows the comparison matrix. As can be seen in Figure 8, the groundwater level is specified in 5 classes: very low, low, medium, high and very high. Table 8 shows (1) drainage

density, (2) slope, (3) precipitation, (4) geology, (5) land use, (6) geomorphology, (7) fault density. Drainage density and precipitation were chosen as the most influencing causes, while slope and geology were chosen as the classes with the least impact. As can be seen in Figure 9, the areal distribution of the groundwater level in hectares according to the classes shown in Figure 8 is given. It is seen that the class that covers the most area is the low level, and the class that covers the least area is the groundwater level at the very high level. It is also seen that the groundwater level height of Sur, Yenişehir, Kayapınar and Çınar districts, which are among the central districts, is better than other places.

Table 7. Precipitation comparison matrix

mm	1	2	3	4	5	Weight coefficients		Consistency check
1	1	3	5	7	9	0.503	50.30%	Consistency OK
2	1/3	1	3	5	7	0.26	26.00%	8%
3	1/5	1/3	1	3	5	0.134	13.40%	
4	1/7	1/5	1/3	1	3	0.068	6.80%	
5	1/9	1/7	1/5	1/3	1	0.035	3.50%	

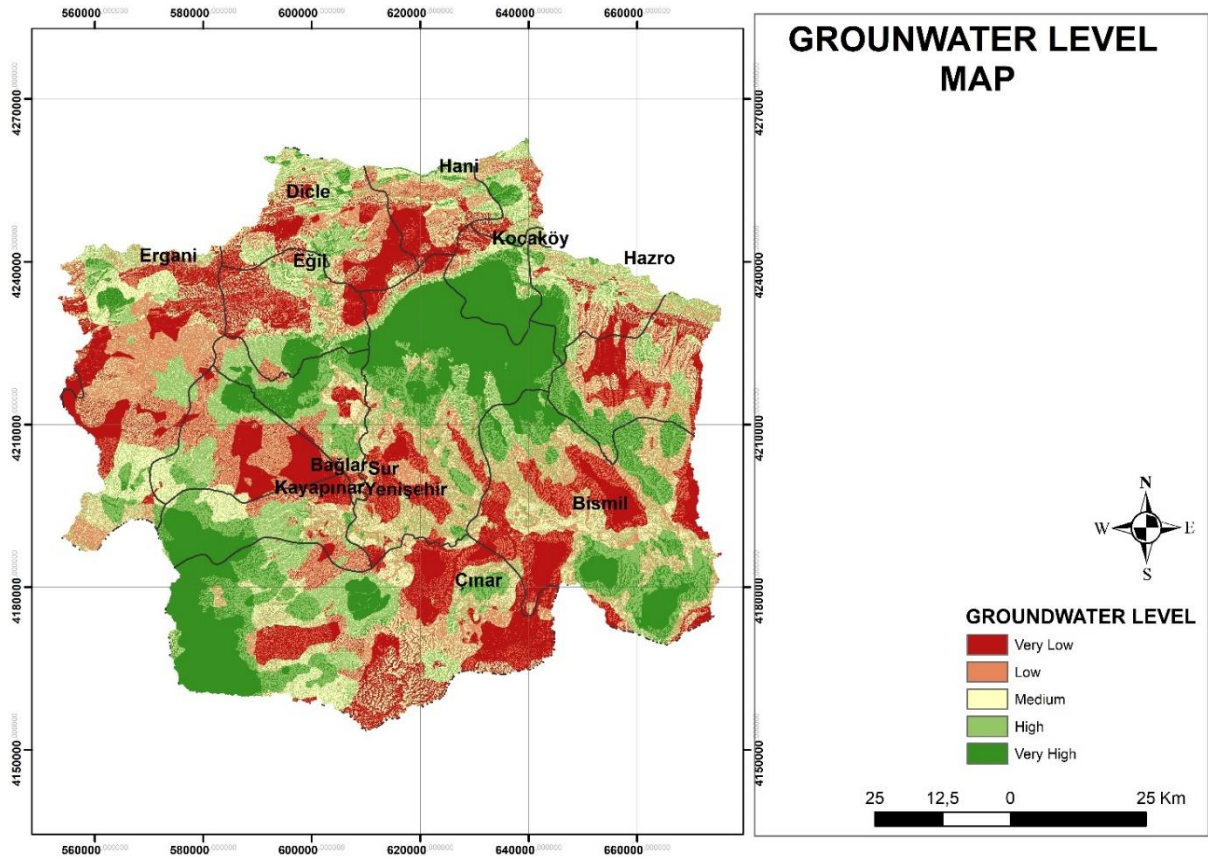


Figure 9. Groundwater level map

Table 8. Groundwater level comparison matrix

	1	2	3	4	5	6	7	Weight coefficients	Consistency check
1	1	6	2	5	3	4	7	0.352	35.20%
2	1/6	1	1/5	1/2	1/4	1/3	2	0.047	4.70%
3	1/2	5	1	4	2	3	6	0.239	23.90%
4	1/5	2	1/4	1	1/3	1/2	3	0.071	7.10%
5	1/3	4	1/2	3	1	2	4	0.155	15.50%
6	1/4	3	1/3	2	1/2	1	3	0.101	10.10%
7	1/7	1/2	1/6	1/3	1/4	1/3	1	0.034	3.40%

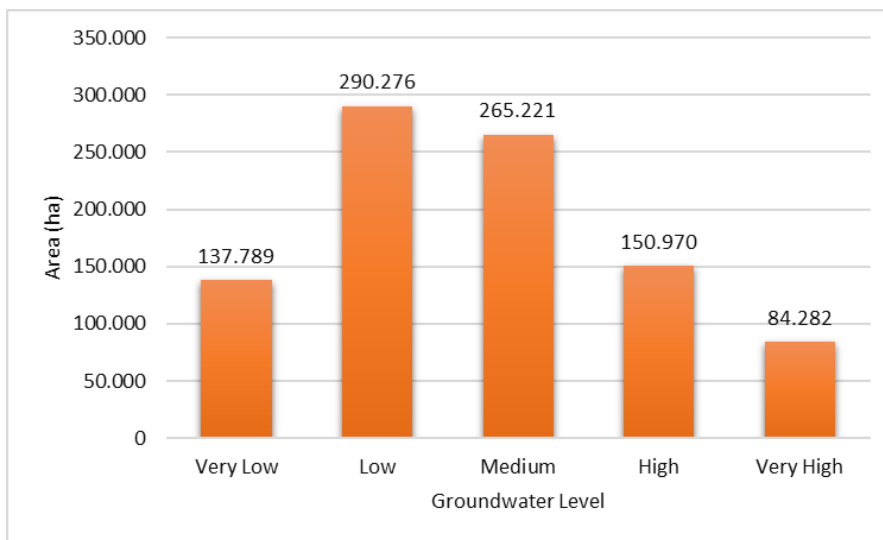


Figure 9. Areal distribution of groundwater level classes

There are different spatial distributions of groundwater levels as shown in [Figure 9](#). There are many reasons for the heterogeneous and different distribution. Differences in groundwater levels in a region occur due to the effects of geological, hydrological, environmental and surface reservoir factors. Geological structure is one of the main reasons for these differences. Groundwater levels are determined by the presence and properties of different aquifer types such as basalt and limestone. While basalt aquifers show high permeability and wide distribution, limestone aquifers contain high porosity and karstic structures, which cause differences in water carrying capacities. In addition, porosity and permeability properties of rocks are important factors affecting water levels; formations with high permeability provide higher water levels, while low permeability can reduce water levels.

It is an effective factor on the variability of groundwater levels in hydraulic conditions. Water pressure and elevation determine how fast and how high aquifers can carry water. The direction and speed of water flow have a direct effect on groundwater levels; Water transfer and movement between aquifers can affect water levels. Topographic features also play an important role; water levels are generally deeper in high mountain regions, while shallower levels can be observed in plains and valleys. Surface runoff and drainage systems also affect groundwater levels; in lowland regions, intense surface runoff can increase groundwater levels.

Climate and rainfall conditions are other important factors that cause changes in water levels. The amount and distribution of rainfall in a region directly affects water levels in aquifers; high rainfall can increase water levels, while low rainfall and drought periods can cause water levels to fall. Temperature and evaporation rates also have an effect; high temperatures and evaporation can lead to a decrease in surface water and thus to a decrease in groundwater levels.

Aboveground reservoirs also have a significant effect on groundwater levels. Aboveground reservoirs are areas where water is stored on the surface, and these reservoirs affect groundwater levels in various ways. Large reservoirs, dams and water storage facilities can have an indirect effect on groundwater levels. For example, the construction of a dam or the formation of a reservoir can increase or regulate groundwater levels, as such reservoirs affect surface runoff and the infiltration of water into the ground. In addition, changes in the water level of these reservoirs can indirectly affect groundwater levels; higher reservoir levels can increase groundwater levels, while lower reservoir levels can reduce groundwater levels.

4 Conclusion

In this study, it was aimed to determine the groundwater levels for the study area of Diyarbakır province by using the analytical hierarchy method (AHP) in estimating groundwater levels. The data obtained in hectares were used to identify groundwater levels in five different categories: very low, low, medium, high, and very high.

The results obtained show that there is a certain distribution in the region that the research focuses on. The

findings of our study revealed that groundwater levels are particularly concentrated in the "Medium" and "High" categories. However, it has been determined that there are fewer regions in the "Very Low" and "Very High" categories. This distribution shows that the groundwater in the region is heterogeneously distributed.

Groundwater levels being high, medium, very high or low depending on the interaction of various geological, hydrological and environmental factors. High water levels are usually seen in aquifers with high permeability and in regions with high rainfall. For example, karst and volcanic layers and large plains allow water to accumulate easily and be held at high levels. In addition, high rainfall amounts and continuous water supply also increase these levels. Medium water levels are usually observed in aquifers with medium permeability and in balanced rainfall conditions, which have a limited effect on water movement and accumulation.

Low groundwater levels are associated with formations with low permeability, arid climates and low rainfall amounts. For example, clay layers restrict water movement and reduce water levels. In addition, intensive water abstraction and human activities can also reduce water levels. Topographic features can affect the capacity of water to infiltrate into the ground, and this becomes more pronounced in regions with low slopes. All of these factors determine the variability in groundwater levels, leading to different classes of water levels.

We see that AHP is an effective method for estimating groundwater levels. However, it may benefit that future research be done using more data and more advanced analysis methods to improve the accuracy of the model.

Our results can be an important reference point for local governments and other organizations that manage water resources. The use of this data in the sustainable management of water resources and environmental planning processes is important to better adapt to the changing nature of groundwater levels.

This study highlighted the usability of AHP for the determination of groundwater levels and how this information can be reflected in environmental and societal impacts. Future research is expected to contribute to further steps in the field of groundwater management.

In future studies, more detailed modeling of different aquifer types and geological formations can be done, which will increase the accuracy of the results obtained in groundwater level estimations. In addition, the effects of climate change and precipitation regimes on groundwater levels can be better understood by analyzing long-term climate data. In addition, comprehensive field studies examining human impacts, especially pumping rates and water use, can be conducted, so that the effects of these factors on the estimation results can be better evaluated. In order to increase model accuracy, machine learning and artificial intelligence techniques can be integrated into existing estimation methods. These approaches can increase the accuracy and reliability of groundwater level estimations by expanding data sets and performing more dynamic analyses. In addition, changes in groundwater levels can be

monitored more effectively by integrating different data sources and establishing continuous monitoring systems.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 10%

References

- [1] I. K. Seidenfaden et al., Evaluating recharge estimates based on groundwater head from different lumped models in Europe. *J Hydrol Reg Stud.*, 47, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101399>
- [2] V. Agarwal et al., Machine learning based downscaling of GRACE-estimated groundwater in Central Valley, California. *Science of the Total Environment*, 865, Mar. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161138>
- [3] A. Mochizuki and E. Ishii, Paleohydrogeology of the Horonobe area, Northern Hokkaido, Japan: Groundwater flow conditions during glacial and postglacial periods estimated from chemical and isotopic data for fracture and pore water. *Applied Geochemistry*, 155, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105737>
- [4] S. Yalvaç, S. Alemdağ, H. İ. Zeybek, and M. Yalvaç, Excessive groundwater withdrawal and resultant land subsidence in the Küçük Menderes River Basin, Turkey as estimated from InSAR-SBAS and GNSS measurements. *Advances in Space Research*, 72(10), 4282–4297, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.08.001>
- [5] N. Zheng, Z. Li, X. Xia, S. Gu, X. Li, and S. Jiang, Estimating line contaminant sources in non-Gaussian groundwater conductivity fields using deep learning-based framework. *J Hydrol (Amst)*, 630, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130727>
- [6] A. Intriago, P. Galvão, and B. Conicelli, Use of GIS and R to estimate climate change impacts on groundwater recharge in Portoviejo River watershed, Ecuador. *J South Am Earth Sci.*, 124, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104288>
- [7] F. Felfelani et al., Simulation of groundwater-flow dynamics in the U.S. Northern High Plains driven by multi-model estimates of surficial aquifer recharge. *J Hydrol (Amst)*, 630, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130703>
- [8] M. F. Alam et al., Energy consumption as a proxy to estimate groundwater abstraction in irrigation. *Groundw Sustain Dev*, 23, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.101035>
- [9] A. O. Affum, E. E. Kwaansa-Ansah, and S. D. Osae, Estimating groundwater geogenic arsenic contamination and the affected population of river basins underlain mostly with crystalline rocks in Ghana. *Environmental Challenges*, 15, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100898>
- [10] R. P. Chapuis et al., Numerical convergence does not mean mathematical convergence: Examples of simple saturated steady-state groundwater models with pumping wells. *Comput Geotech*, 162, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105615>
- [11] M. D. Faye, V. Y. B. Loyara, A. C. Biaou, R. Yonaba, M. Koita, and H. Yacouba, Modelling groundwater pollutant transfer mineral micropollutants in a multi-layered aquifer in Burkina Faso (West African Sahel). *Helion*, 10(1), 2024. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23557>
- [12] M. F. P. Bierkens, L. P. H. Rens van Beek, and N. Wanders, Gisser-Sánchez revisited: A model of optimal groundwater withdrawal under irrigation including surface-groundwater interaction. *J Hydrol (Amst)*, 635, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131145>
- [13] J. Sabah Mustafa and D. Khider Mawlood, Mathematical modeling for groundwater management for multilayers aquifers (Erbil basin). *Ain Shams Engineering Journal*, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102781>
- [14] M. A. Habib et al., Evaluating arsenic contamination in northwestern Bangladesh: A GIS-Based assessment of groundwater vulnerability and human health impacts. *Helion*, e27917, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27917>
- [15] S. A. M. Querishi and S. M. Ghavami, AquMADE: A GIS-based web application to assess groundwater quality by introducing a risk-based irrigation water quality index (RB-IWQI). *Environmental Modelling & Software*, 106009, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106009>
- [16] J. Hornero, M. Manzano, L. Ortega, and E. Custodio, Integrating soil water and tracer balances, numerical modelling and GIS tools to estimate regional groundwater recharge: Application to the Alcadozo Aquifer System (SE Spain). *Science of the Total Environment*, 568, 415–432, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.011>
- [17] G. Bennett, "Analysis of methods used to validate remote sensing and GIS-based groundwater potential maps in the last two decades: A review. *Geosystems and Geoenvironment*, 3(1), 2024. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2023.100245>
- [18] V. N. Prapanchan, T. Subramani, and D. Karunanidhi, GIS and fuzzy analytical hierarchy process to delineate groundwater potential zones in southern parts of India. *Groundw Sustain Dev*, 25, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101110>
- [19] M. Badika, S. Capdevielle, P. Forquin, D. Saletti, and M. Briffaut, Experimental study of the shear behavior of concrete-rock interfaces under static and dynamic loading in the context of low confinement stress. *Eng Struct.*, 309, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118059>
- [20] J. Torres, M. Vivar, M. Fuentes, A. M. Palacios, and M. J. Rodrigo, Performance of the SolWat system operating in static mode vs. dynamic for wastewater treatment: Power generation and obtaining reclaimed water. *J Environ Manage*, 324, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116373>

- [21] C. Leng, M. Jia, H. Zheng, J. Deng, and D. Niu, Dynamic liquid level prediction in oil wells during oil extraction based on WOA-AM-LSTM-ANN model using dynamic and static information. *Energy*, 282, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128981>
- [22] M. Krzaczek, J. Tejchman, and M. Nitka, Coupled DEM/CDF analysis of impact of free water on the static and dynamic response of concrete in tension regime. *Comput Geotech*, 172, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106449>
- [23] M. Öztürk, R. Çelik, Diyarbakır Ovası'nın yeraltı su seviye haritalarının coğrafik bilgi sistemi (Cbs) ile tespiti. İMO su konferansı, 125-135, 2008. <https://www.researchgate.net/publication/291115759>
- [24] B. Gül, N. Kayaalp; Investigation of the floodevent under global climate change with different analysis methods for both historical and future periods. *Journal of Water and Climate Change*, 15(8), 3939-65, 2024. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.196>





Green inhibition effect of *Pyracantha coccinea* (Rosaceae) berries in assessing of acidic corrosion of iron

Demirin asidik korozyonunu değerlendirmede *Pyracantha coccinea* (Rosaceae) meyvelerinin yeşil inhibisyon etkisi

Demet Özkır^{1,*} 

¹ Niğde Ömer Halisdemir University, Department of Chemistry, 51240, Niğde, Türkiye

Abstract

The purpose of this study is to explore the potential of *Pyracantha coccinea* berries extract as a sustainable and environmentally friendly corrosion inhibitor on iron electrode under ambient conditions. This green inhibitor's impact was examined using different electrochemical experiments such as potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). After a one-hour examination of the experiments with three different concentrations of *Pyracantha coccinea* berry extract, it was determined that the berry extract strongly inhibited the iron electrode in a solution containing 1.0 M HCl. The extract from *Pyracantha coccinea* berries revealed a strong inhibitor action, and iron electrode protection in HCl solutions increased as pyracantha extract concentrations increased. Finally, surface images were taken after an hour of immersion using a field-emission scanned electron microscope (FE-SEM) to analyse the surface morphology of the iron electrodes in aggressive HCl electrolyte with and without *Pyracantha coccinea* berry extract, and the surface containing the pyracantha extract was smoother than the blank one.

Keywords: Green extract, Red firethorn, Iron, Acidic corrosion, FE-SEM

1 Introduction

Iron is an essential material used in various industries due to its mechanical properties, availability and cost-effectiveness [1]. Iron, a fundamental material in numerous industrial applications, is prone to corrosion, especially under acidic conditions. This susceptibility poses significant challenges, particularly in industries that rely heavily on iron for machinery and infrastructure [2]. One such critical process is pickling, where metals are treated with acidic solutions to remove impurities, oxides, and scale. While essential for ensuring the quality and longevity of metal products, pickling exacerbates the problem of acid-induced corrosion [3].

The consequences of corrosion are manifold and severe. They include material degradation, loss of mechanical integrity, increased maintenance costs, and potential safety hazards. The application of corrosion inhibitors has become a standard practice to mitigate these adverse effects. These

Öz

Bu çalışmanın amacı, *Pyracantha coccinea* meyvelerinin ekstrakt çözeltisinin ortam koşullarında bulunan demir elektrot üzerinde çevre dostu ve sürdürülebilir bir korozyon inhibitörü olarak potansiyelini araştırmaktır. Bu yeşil inhibitörün etkisi, potansiyodinamik polarizasyon ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) gibi farklı elektrokimyasal teknikler kullanılarak incelenmiştir. *P. coccinea* meyve ekstraktının üç farklı derişimleriyle yapılan deneylerin bir saatlik incelenmesinin ardından, meyve ekstraktının 1,0 M HCl çözeltisindeki demir elektrot üzerinde güçlü bir inhibisyon sergilediği belirlenmiştir. *P. coccinea* meyvelerinden elde edilen ekstrakt, güçlü bir inhibitör etki gösterdi ve pirakanta ekstraktı derişimindeki artışla birlikte, demir elektrotların HCl çözeltisindeki koruyucu etkisi de artmıştır. Son olarak, *P. coccinea* meyve ekstraktı içeren ve içermeyen agresif HCl elektrolitindeki demir elektrotlarının yüzey morfolojilerini analiz etmek için alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) kullanılarak bir saatlik daldırma sonrasında yüzey görüntüleri alınmış ve *P. coccinea* ekstresi içeren yüzeyin boş olandan daha pürüzsüz olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Yeşil ekstrakt, Kıvıll ateşdikenii, Demir, Asidik korozyon, FE-SEM

substances, when added in small quantities, can drastically reduce the rate of corrosion by forming protective barriers on the metal surface. Both organic and inorganic corrosion inhibitors are frequently referred to as corrosion inhibitors [4]. Due to its huge dosage and significant environmental contamination, the use of inorganic corrosion inhibitors has been severely limited [5, 6]. These special qualities can beneficially guarantee that the molecules acting as corrosion inhibitors efficiently adsorb onto the metal surface.

Most of corrosion inhibitors now in use pose a risk to living things. In light of the current emphasis on protecting the green environment, research on new eco-friendly corrosion inhibitors has been gaining great priority recently. In particular, plant extracts constitute a significant source of corrosion inhibitors that are safe for the environment in this field. Plant extracts are being preferred more frequently mainly because they may be easily and affordably obtained from various plant parts. These extracts are among the new

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: dozkir@ohu.edu.tr (D. Özkır)

Geliş / Recieved: 04.08.2024 Kabul / Accepted: 15.08.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1527976

types of green corrosion inhibitors due to their reasonable cost, renewability, sustainability, non-toxic nature, and eco-friendliness. [7, 8].

In some studies conducted in the literature, Sajadi et al. [9] comparatively investigated the preventive effect of *lemon verbena* (lemon v.) extract as a green corrosion inhibitor on the corrosion of mild steel in 0.5 M H₂SO₄ and 1 M HCl solutions. Pai et al. [10] studied *Tabebuia heterophylla* plant leaves extract as corrosion inhibitor for low carbon steel in 1 M HCl solution. The main role in corrosion inhibition was due to Hexadecanoic acid 2-hydroxy-1-(hydroxymethyl) ethyl ester in it was analyzed by GC-MS. Muhammad et al. [11] investigated the capacity of *Kopsia teoi* (K. teoi) employing its stem extracts and three distinct extracts to prevent mild steel corrosion in 0.5 M HCl.

The increasing trend towards these inhibitors is driven by the need for sustainable and eco-friendly alternatives to traditional synthetic inhibitors, which often pose environmental and health risks. They include a range of chemical substances that have been demonstrated to have potent anti-corrosion activities, including tannins, alkaloids, and flavonoids, called secondary metabolites [12, 13].

This study aims to investigate the efficacy of *P. coccinea* berries extract collected from the central campus of Niğde Ömer Halisdemir University in inhibiting the acidic corrosion of iron, with a focus on their application by potentiodynamic polarization and EIS techniques. By exploring these natural inhibitors, it will be tried to contribute to the development of safer and more sustainable corrosion management practices in the industry. The berries of *P. coccinea* are tapped in traditional medicine for their cardiac, tonic, and diuretic qualities. Prior studies have demonstrated the existence of flavonoids in both the aerial and hypogea sections of adult plants, despite the significant differences in their qualitative contents [14, 15]. Nevertheless, there isn't a report on the technical study of applying and employing this type of *P. coccinea* aqueous extract as a green corrosion inhibitor on the iron in 1.0 M HCl solution among the publications that are now available. Finally, the surface morphology of iron electrodes in both inhibited and uninhibited solutions was evaluated analyzing field emission scanning electron microscopy (FE-SEM). As a result of support from these analyses, anti-corrosion performance of green inhibitor has been fully disclosed.

2 Material and method

2.1 Plant specimen

The *P. coccinea* berries utilized in this study were gathered in December 2023 from Niğde Ömer Halisdemir University's central campus (Figure 1).



Figure 1. Photographs of gathered *Pyracantha coccinea* berry specimens (original)

2.2 *Pyracantha coccinea* berries extract solutions

Approximately 10 g of dried *P. coccinea* berries (Figure 2) were embedded in a reaction flask (250 mL) and refluxed for 10 h with the contribution of adequate distilled water. The aqueous berry extract was filtered after the 10-hour reflux process, yielding an approximately 110 mL volume with a brick orange colour (Figure 3). Following the evaporation of 10 mL of *P. coccinea* berries extract, the concentration of the stock solution made from the berries was calculated to be 2.147% (w/v). This stock solution was diluted to prepare the other additional concentrations.



Figure 2. Dried *Pyracantha coccinea* berries



Figure 3. Schematic of *Pyracantha coccinea* berries extraction procedure

2.3 Electrochemical experiments

The iron electrodes used in corrosion tests have the following chemical composition (wt%): 0.21700 Cu, 0.00198 Co, 0.01100 P, 0.08400 C, 0.06030 Cr, 0.07890 Ni, 0.10200 Si, 0.00222 Nb, 0.01040 Mo, 0.01100 V, 0.01900 S, 0.01620 Sn, 0.40900 Mn, and the remaining Fe. Using the established three electrode method at ambient temperature and a CHI-660B model electrochemical analyzer, two electrochemical experiments were carried out. Iron was tapped with a cross-sectional area of 0.5024 cm² and utilized as the working electrode. The iron electrode's surface was mechanically sanded using emery papers with 150–600 grids to achieve the same level of surface roughness. The greasy residues were then removed with acetone and the electrode was cleaned with distilled-water. Ag/AgCl (3.0 M KCl) electrode served as the reference electrode, while a platinum sheet with a surface area of 2.0 cm² served as the counter electrode.

For the equilibrium of the system, the iron electrodes were immersed in the electrolyte extract solutions for an hour before the experiments started. EIS tests were conducted with an amplitude of 5 mV to prevent corrosion at

frequencies ranging from 1.0×10^5 to 5.0×10^{-3} Hz. At anodic/cathodic potentials of ± 0.350 V in relation to E_{corr} , respectively, the potentiodynamic polarization tests were recorded. The scan rate used for this was 1.0 mV s^{-1} . Using the Tafel extrapolation method, the values of the corrosion process's current density (i_{corr}) were found from the potentiodynamic polarization curves. All electrochemical experiments were fulfilled both with and without a 1.0 M HCl solution for three concentrations of *P. coccinea* berry extract.

Surface surveys were performed after the immersion of 1 h in a HCl electrolyte solution, both with and without highest concentration of *P. coccinea* berry extract, utilizing the analysis of FE-SEM with computer controlled (Zeiss GeminiSEM 500).

3 Results and discussion

3.1 Green corrosion inhibition by EIS and potentiodynamic polarization experiments

The effects of *P. coccinea* berry extract, which has a green inhibitory effect on the iron surface, were measured using potentiodynamic polarization and impedance techniques throughout the course of an hour-long immersion at 298 K at three different concentrations. Whether organic or plant-based inhibitors are utilized, EIS is one of the most quickly, most straightforward techniques that is frequently chosen when examining the inhibitive qualities of all these compounds on materials in aggressive electrolyte solutions [16-18].

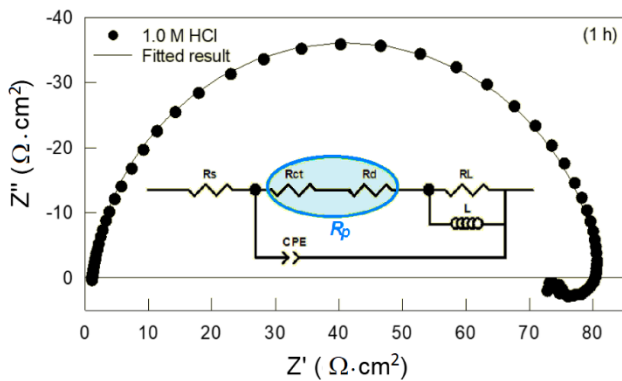


Figure 4. EIS diagram and proposed electrical equivalent circuit for 1.0 M HCl solution after immersion for 1 hour

In this procedure, two types of equivalent circuit models were put into use, one for the 1.0 M HCl solution inserted in the Nyquist diagram in Figure 4 and the other for the inhibited extract solutions inserted inside the Nyquist curves again in Figure 5.

Figures 4 and 5 display the EIS results, which are Nyquist plots used to further examine the *P. coccinea* berry extract's ability to suppress green corrosion. Zview2 software was utilized to fit the equivalent circuits for the inhibition and corrosion processes from the EIS data. Remarkably, a unique inhibitor layer forms on the iron surface in solutions containing *P. coccinea* berry extract, and this leads to a proportional increase in resistance. A better understanding is

given by Figure 5, which shows that the addition of *P. coccinea* berry extract in different concentrations reduces the corrosion of iron electrodes in a 1.0 M HCl solution. The *P. coccinea* berry extract takes place a preservative film on the iron surface, which helps to prevent corrosion. Moreover, the EIS diagram in Figure 5 clearly shows that as the concentration of the *P. coccinea* berry extract enhances, the capacitive loops become larger.

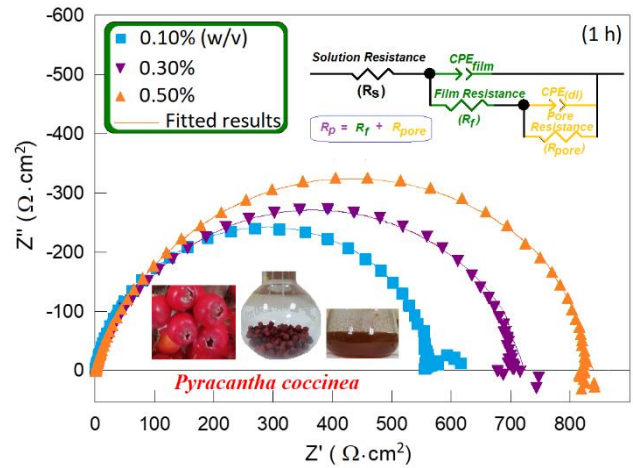


Figure 5. Proposed electrical equivalent circuits and EIS diagrams with varying *P. coccinea* berry extract concentrations

Table 1 provides a summary of the relevant potentiodynamic polarization parameters and EIS. Two separate frequency zones can be seen in the impedance plots: the high frequency area is related to the diffusion layer (R_d) and charge transfer (R_{ct}) during the corrosion process. Inhibition happens in the low frequency range, which is controlled by the film resistance (R_f) that occurs on the iron surface from the berry extract of *P. coccinea*. In addition, as seen in Figure 5, the fire thorn berry extract solution procedure has two constant phase components (CPE). The first one is the double layer capacitance (CPE_{dl}), and the second one is the film layer capacitance (CPE_{film}) occurred on iron surface.

The impact of *P. coccinea* berry aqueous extract on iron corrosion inhibition in 1.0 M HCl is demonstrated in this study by computing the values of percent inhibition efficiency ($\eta\%$) at all concentration using the EIS method in the following manner [19]:

$$\eta(\%) = \left(\frac{R'_p - R_p}{R'_p} \right) \times 100 \quad (1)$$

Where R'_p and R_p are the fire thorn berry extract solutions and uninhibited polarization resistance values, respectively. It was clear from looking at the polarization resistance data obtained from the EIS experiments in Table 1 that adding the fire thorn berry extract to the aggressive solution raised the $\eta\%$ values. The EIS method's data were used to derive inhibitory efficiency values, which varied from 87.63% to 91.45%.

Table 1. Impedance and potentiodynamic polarization results described from the measurements in solutions with and without *P. coccinea* berry extract

C (w/v %)		EIS						
<i>P. coccinea</i> berry extract	E_{ocp} (V/Ag/AgCl)	R_s ($\Omega \text{ cm}^2$)	CPE ($\mu\text{F cm}^2$)	n	R_L ($\Omega \text{ cm}^2$)	L (H)	R_p ($\Omega \text{ cm}^2$)	η (%)
1.0 M HCl	-0.474	1.2	110	0.94	8	4	72	-
0.10	-0.475	1.3	80	0.87	-	-	582	87.63
0.30	-0.468	1.1	61	0.80	-	-	730	90.14
0.50	-0.462	1.2	52	0.79	-	-	842	91.45

*Potentiodynamic polarization				
<i>P. coccinea</i> berry extract	* E_{corr} (V/Ag/AgCl)	$-\beta_c$ (mV dec ⁻¹)	i_{corr} ($\mu\text{A cm}^2$)	* η (%)
1.0 M HCl	-0.475	108	265	-
0.10	-0.464	93	32	87.92
0.30	-0.470	93	24	90.94
0.50	-0.478	92	21	92.08

The capacitance data in the aggressive solution was recorded at 110 $\mu\text{F/cm}^2$. Nevertheless, it was noted that adding *P. coccinea* berry extract to the HCl solution caused this value to drastically drop, with CPE values ranging between 80 and 52 $\mu\text{F/cm}^2$ [20].

Furthermore, the open circuit potential (E_{ocp}), which was originally measured at -0.474 V in the hydrochloric acid electrolyte, altered to more anodic potentials when *P. coccinea* berry extract was added to the solution (Table 1). The metal's surface inhomogeneity coefficient is represented by the "n" value that is discovered by curve fitting using the Zview2 software. These values declined as the inhibitor concentration enhanced. It can be suggested as a proof of the adsorption of more phytochemical compounds on the iron by declining the active surface area, by virtue of enhancing the green inhibitor concentration and the "n" values minimized. Table 1 also displays the iron electrode's dissolution treatment parameters, which were ascertained by the use of a second electrochemical approach called the *Tafel extrapolation method.

The potentiodynamic polarization graphs for the iron electrodes in aggressive solution with three different *P. coccinea* berry extract concentrations at 298 K are shown in Figure 6.

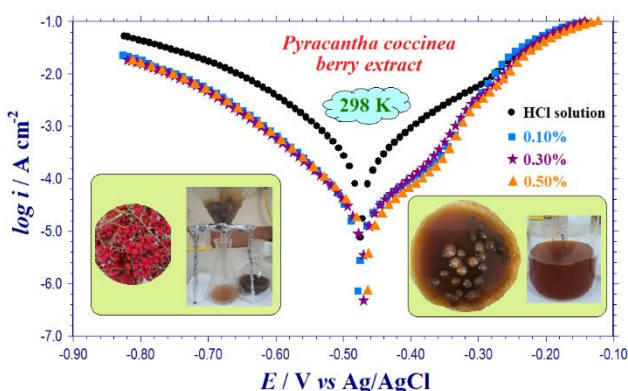


Figure 6. Potentiodynamic polarization plots of iron electrodes in hydrochloric acid for three concentrations of *P. coccinea* berry extract

Without the extract, the corrosion current density (i_{corr}) was found at 265 $\mu\text{A/cm}^2$. The Equation (2) that follows provides the percent inhibition efficiencies (* $\eta\%$) derived from the Tafel plots [21].

$$(\%) = \left(\frac{i_{corr} - i'_{corr}}{i_{corr}} \right) \times 100 \quad (2)$$

In this context, * $\eta\%$, i_{corr} , and i'_{corr} represent the inhibition efficiency derived from Tafel plots, as well as the corrosion current density values for both 1.0 M HCl and containing extract solutions, respectively.

Nevertheless, the i_{corr} values progressively dropped after the fire thorn berry extract was added to the HCl solution (*Table 1). In contrast to the declining i_{corr} values, the increasing concentration was accompanied by an increase in the * $\eta\%$ values, which became 87.92%, 90.94%, and 92.08%, respectively. The cathodic Tafel constant ($-\beta_c$) in the green inhibitor-containing solutions ranged from 92 mV dec⁻¹ to 93 mV dec⁻¹, whereas it was 108 mV dec⁻¹ in the 1.0 M HCl medium. The comparatively stable cathodic Tafel constants in solutions containing and excluding *P. coccinea* berry extract indicate that the inhibitor under study had little effect on the mechanism of hydrogen evolution [22]. Figure 6 and Table 1 show that the * E_{corr} value was recorded at -0.475 V in aggressive solution for the iron electrode by Tafel extrapolation of cathodic curve at 298 K. But the * E_{corr} values moved toward more anodic potentials when *P. coccinea* berry extract solutions were added.

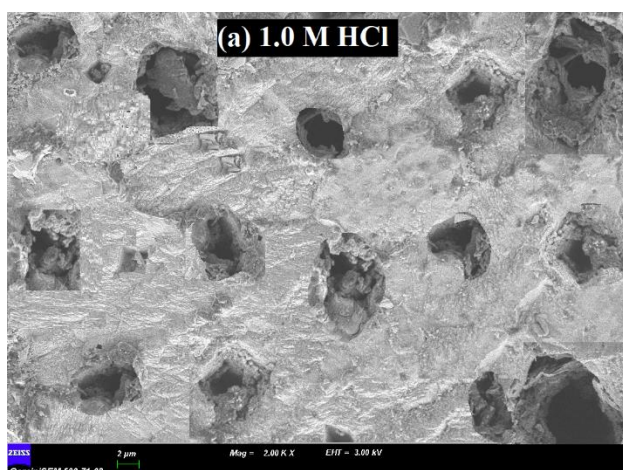
As can be seen clearly from Figure 6 and Table 1, current density values declined drastically in solutions containing fire thorn extract compared to the aggressive solution without extract. At the same time, when *P. coccinea* berry extract was added to hydrochloric acid medium, almost the same rate current decreases were observed in both anodic and cathodic curves, which can be attributed to the mixed-type inhibitor behaviour of *P. coccinea* berry extract for the iron electrode in 1.0 M HCl medium [23-25]. The conclusion that *P. coccinea* berry extract adsorption on the metal surface is an unavoidable phenomenon was reached based on the complementary data from the two testing methods. Furthermore, because this extract has no negative impacts on

the environment, it can be regarded as a non-toxic green inhibitor.

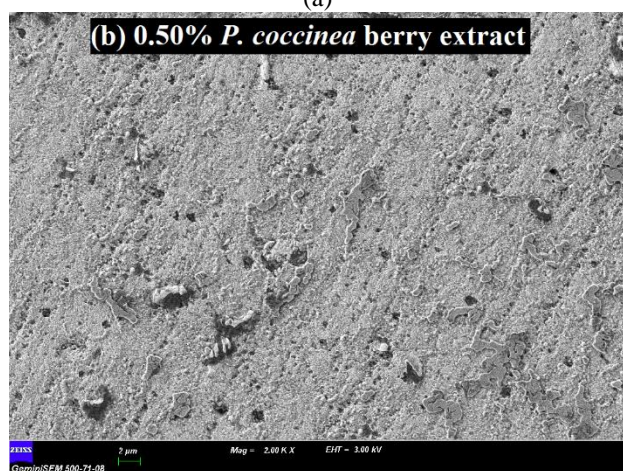
3.2 Morphological characterization by FE-SEM analysis

Field emission scanning electron microscope is widely preferred in corrosion inhibition studies because it provides much higher resolution surface images. Figure 7 depicts the surface morphology of iron electrodes immersed for 1 h in HCl medium, both with and without the presence of 0.50% *P. coccinea* berry extract concentration at 298 K.

As illustrated in Figure 7(a), the entire iron surface was extensively corroded, with eroded pits that were incredibly dense and irregular, after immersion in HCl medium under uninhibited solution. The surface morphology is shown in Figure 7(b) with the addition of 0.50% (w/v) *P. coccinea* berry extract. It is apparent that the entire iron surface gets smoother and that the amount of corroded cavities significantly decreases [26]. It can be said that the berry extract of *P. coccinea* almost acts as a sort of cover for the iron surface. It demonstrates that the berry extract of *P. coccinea* may effectively inhibit the iron corrosion brought on by the HCl solution.



(a)



(b)

Figure 7. FE-SEM morphologies of iron electrodes for 1 h immersion

4 Conclusions

Two electrochemical techniques were used in this study to analyse the impact of *P. coccinea* berry extract—a green inhibitor that is ecologically friendly—on the corrosion behaviour of Fe in HCl medium. The *P. coccinea* berry extract was demonstrated to be substantially adsorbed on the metallic surface and to exhibit an impressive 90% inhibition rate at all extract concentrations. When two distinct experimental procedures were applied, rising the concentration of *P. coccinea* berry extract resulted in a boost in the inhibition efficiencies. This finding suggests that a boost in the concentration of the fire thorn extract corresponds with an elevation in the amount of organic compounds adhered to the iron surface.

The key to attaining such an excellent inhibition efficiency against iron corrosion is the chemical makeup of phytochemicals, or secondary metabolites, present in *P. coccinea* berry. These compounds are distinguished by double bonds between phenolic molecules, π electrons and aromatic rings among other properties. Consequently, these characteristics are primarily responsible for their great inhibitor efficiency in controlling iron corrosion in this regard. As these naturally found, non-toxic compounds in plant extracts are biodegradable and involve no hazardous materials, their inhibitory impact is exceptionally critical for industrial processes as well as the environment. The surface observations in the fire thorn extract solution was seen to be rather smooth and the holes were apparently covered compared to the observation in the uninhibited one, in order to more thoroughly analyze the impact of the *P. coccinea* berry extract on the iron. The experimental methods' data are in excellent line with the surface observations.

Conflict of interest

The author claims that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 12%

References

- [1] B. Tan, Y. Liu, Z. Gong, X. Zhang, J. Chen, L. Guo, J. Xiong, J. Liu, R. Marzouki and W. Li, *Pyracantha fortuneana* alcohol extracts as biodegradable corrosion inhibitors for copper in H₂SO₄ media, *Journal of Molecular Liquids*, 397, 124117, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.124117>.
- [2] A. Abd-ElHamid, W. El-dougDoug, S. M. Syam, I. Aiad, S. M. Shaban and D. -H. Kim, Synthesis of gemini cationic surfactants-based pyridine Schiff base for steel corrosion and sulfate reducing bacteria mitigation, *Journal of Molecular Liquids*, 369, 120890, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120890>.
- [3] H. Karima, B. Sameh, B. Baya, B. Louiza, H. Soraya, B. Hatem and B. Merzoug, Corrosion inhibition impact of *Pyracantha coccinea* M. Roem extracts and their use as additives in zinc electroplating: Coating morphology, electrochemical and weight loss investigations, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 121, 337-348, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2021.04.007>.

- [4] K. Dahmani, M. Galai, M. Ouakki, A. Elgendy, R. Ez-Zriouli, R. Lachhab, S. Briche and M. Cherkaoui, Corrosion inhibition of copper in sulfuric acid via environmentally friendly inhibitor (Myrtus Communis): Combining experimental and theoretical methods, *Journal of Molecular Liquids*, 347, 117982, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117982>.
- [5] S. Wan, H. Wei, R. Quan, Z. Luo, H. Wang, B. Liao and X. Guo, Soybean extract firstly used as a green corrosion inhibitor with high efficacy and yield for carbon steel in acidic medium, *Industrial Crops and Products*, 187, 115354, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115354>.
- [6] H. E. Aadad, M. Galai, M. Ouakki, A. Elgendy, M. E. Touhami and A. Chahine, Improvement of the corrosion resistance of mild steel in sulfuric acid by new organic-inorganic hybrids of Benzimidazole-Pyrophosphate: Facile synthesis, characterization, experimental and theoretical calculations (DFT and MC), *Surfaces and Interfaces*, 24, 101084, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101084>.
- [7] D. Özkır, The role of *Lavandula* sp. extract for effective inhibiting the mild steel corrosion in the hydrochloric acid solution, *International Journal of Chemistry and Technology*, 5(2), 125–132, 2021. <https://dx.doi.org/10.32571/ijct.943385>.
- [8] D. Özkır, The green inhibitive effect of *Ptychostomum schleicheri* (Bryophyta) extract on mild steel corrosion, *Anatolian Bryology*, 8(2), 114–122, 2022. <https://doi.org/10.26672/anatolianbryology.1193546>.
- [9] G. S. Sajadi, F. Salmanian, R. Naghizade and S. M. A. Hosseini, The inhibitive action of lemon verbena plant extract as an economical and eco-friendly corrosion inhibitor for mild steel in acidic solutions, *International Journal of Electrochemical Science*, 19, 100699, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100699>.
- [10] G. D. Pai, M. R. Rathod, S. K. Rajappa and A. A. Kittur, Effect of tabebuia heterophylla plant leaves extract on corrosion protection of low carbon steel in 1M HCl medium: Electrochemical, quantum chemical and surface characterization studies, *Results in Surfaces and Interfaces*, 15, 100203, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rsufi.2024.100203>.
- [11] M. T. Muhammad, M. H. Hussin, M. H. Abu Bakar, T. S. Hamidon, S. S. Azahar, K. Awang, M. Litaudon and M. N. Azmi, Corrosion inhibitive performance of Kopsia teoi extracts towards mild steel in 0.5 M HCl solution, *Materials Chemistry and Physics*, 322, 129584, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129584>.
- [12] D. Özkır, Insight into anti-corrosion effect of *Mammillaria prolifera* fruit extract as a green inhibitor for mild steel in HCl solution, *Eurasian Journal of Science Engineering and Technology*, 4(2), 071-077, 2023. <https://doi.org/10.55696/ejset.1387199>.
- [13] D. Özkır, Oleaster leaf extract: a potential environmentally friendly inhibitor for mild steel, *Eurasian Journal of Biological and Chemical Science*, 7(1), 20-25, 2024. <https://doi.org/10.46239/ejbc.1425801>.
- [14] A. R. Bilia, I. Morelli and A. Marsili, Two glycosides from *Pyracantha coccinea* roots: a new lignan and a new chalcone, *Tetrahedron*, 50, 5181-5188, 1994. [https://doi.org/10.1016/S0040-4020\(01\)90428-4](https://doi.org/10.1016/S0040-4020(01)90428-4).
- [15] G. Fico, A. R. Bilia, I. Morelli and F. Tomè, Flavonoid distribution in *Pyracantha coccinea* plants at different growth phases, *Biochemical Systematics and Ecology*, 28, 673-678, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0305-1978\(99\)00109-X](https://doi.org/10.1016/S0305-1978(99)00109-X).
- [16] Y. Wu, Z. Gong, L. Guo and A. A. AlObaid, Batatas lam leaf extract as a biodegradable corrosion inhibitor for copper in 0.5 M H₂SO₄ solution, *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 39, 101601, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101601>.
- [17] M. Rehioui, M. Barbouchi, S. Abbout, B. Benzidia, S. Moussaoui, S. Bikri, R. Hsissou, H. Hammouch, H. Erramli and N. Hajjaji, Development of a promising nontoxic corrosion inhibitor based on *Opuntia dillenii* seed oil for iron corrosion in 3Wt% NaCl: Experimental and theoretical approaches, *Chemical Data Collections*, 46, 101037, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cdc.2023.101037>.
- [18] J.-h. Zhu, B.-l. Lin, T.-h. Duan, H.-q. Lin, G.-y. Zhang, X.-x. Zhou and Y.-y. Xu, *Zea mays* bracts extract as an eco-friendly corrosion inhibitor for steel in HCl pickling solution: Experimental and simulation studies, *Arabian Journal of Chemistry*, 17, 105895, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.arabjoc.2024.105895>.
- [19] G. Aksaray ve B. Doğru Mert, Çukurova Bölgesinde Yetişen Karadut Meyvesinin Yumuşak Çeliğin 0,5 M HCl Çözeltisindeki Korozyon Davranışına Etkisi, *Kadirli Uygulamalı Bilimler Fakültesi Dergisi*, 4(1), 89-103, 2024.
- [20] S. A. Hussein and A. A. Khadom, Okra leaves extract as green corrosion inhibitor for steel in sulfuric acid: Gravimetric, electrochemical, and surface morphological investigations, *Results in Chemistry*, 8, 101566, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101566>.
- [21] K. Hjouji, E. Ech-chihbi, I. Atemni, M. Ouakki, T. Ainane, M. Taleb and Z. Rais, *Datura stramonium* plant seed extracts as a new green corrosion inhibitor for mild steel in 1M HCl solution: Experimental and surface characterization studies, *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 34, 101170, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101170>.
- [22] D. Özkır, The Consistent Effect of *Citrus aurantium* Fruit Peels Extract as New Type Green Inhibitor on Mild Steel Corrosion in HCl Solution, *Bayburt University Journal of Science*, 5(2), 165–172, 2022. <https://dx.doi.org/bufbd.1117000>.
- [23] R. K. Mehta, S. K. Gupta and M. Yadav, Studies on pyrimidine derivative as green corrosion inhibitor in acidic environment: Electrochemical and computational approach, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10, 108499, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108499>



- [24] Z. Akounach, A. Al Maofari, M. Damej, S. El Hajjaji, A. Berisha, V. Mehmeti, N. Labjar, M. Bamaarouf and M. Benmessaoud, Contribution to the corrosion inhibition of aluminum in 1 M HCl by *Pimpinella anisum* extract. Experimental and theoretical studies (DFT, MC, and MD), International Journal of Corrosion and Scale Inhibition, 11 (1), 402-424, 2022. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2022-11-1-24>.
- [25] M. E. Mert ve B. Doğru Mert, Karbon Ayak İzinin Azaltılması için Korozyon İnhibitörü Olarak Son Kullanma Tarihi Geçmiş Depakin Tabletın İncelenmesi, Kadirli Uygulamalı Bilimler Fakültesi Dergisi, 3(1), 56-66, 2023.
- [26] T. Karazehir, M. E. Mert and B. Doğru Mert, Corrosion prevention of mild steel in acidic medium by 2-Pyrrolidin-1-yl-1,3-thiazole-5-carboxylic acid: Theoretical and experimental approach, Journal of Indian Chemical Society, 99(9), 100642, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100642>.





IoT-based fire detection: A comparative study of machine learning techniques

IoT-tabanlı yangın tespiti: Makine öğrenmesi tekniklerinin karşılaştırmalı çalışması

Ahmet Ayтуğ Ayrancı^{1,*} , Burcu Erkmen² 

¹ İstanbul Kültür University Electrical and Electronics Engineering Department, 34158, İstanbul, Türkiye

² Yıldız Technical University Electronics and Communications Engineering Department, 34220, İstanbul, Türkiye

Abstract

Fires that cannot be detected quickly become uncontrollable. The fires that start to spread uncontrollably pose a significant danger to humans and natural life. Especially in public and crowded areas, fires can lead to possible loss of life and massive property damage. Because of this, it is necessary to detect fires as accurately and quickly as possible. Smoke detectors used with Internet of Things (IoT) technology can exchange data with each other. In this study, data collected from two different types of IoT-based smoke detectors were processed using machine learning algorithms. The k-Nearest Neighbor (k-NN), Multilayer Perceptron (MLP), Radial Basis Function (RBF) Network, Naïve Bayes (NB), Decision Tree (DT), Random Forest (RF), and Logistic Model Tree (LMT) algorithms were used. The data obtained from the smoke detectors were processed using machine learning algorithms to create a highly successful model design. The aim of the study is to design an artificial intelligence-based system that enables the early detection of fires occurring both indoors and outdoors.

Keywords: Machine learning, Fire detection system, IoT-based systems, K-fold cross validation

1 Introduction

Establishing a highly accurate fire safety system is necessary to prevent potential disasters in living spaces. Otherwise, major disasters can occur when an uncontrollable fire breaks out. The faster the fire is detected, the higher the probability of bringing it under control. Uncontrolled fires can result in the loss of life and property. With the latest advancements in IoT technology, it has become easier to establish a comprehensive fire detection system [1]. The most commonly used devices in fire detection systems are smoke detectors. These detectors, integrated with IoT technology, can share the data they receive with each other and the control center. By gathering information from multiple sensors, it is possible to achieve more accurate fire detection.

Öz

Hızlı bir şekilde tespit edilemeyen yangınlar kontrolsüz hale gelmektedir. Kontrolsüz biçimde yayılmaya başlayan yangınlar ise insan hayatına ve doğal yaşama büyük tehlike oluşturmaktadır. Özellikle halka açık ve kalabalık olan alanlarda başlayan yangınların olası can kayıplarına ve büyük maddi hasarlara yol açtığı görülmektedir. Bu nedenle yangınları mümkün olduğunca doğru ve hızlı bir şekilde tespit etmek büyük önem taşımaktadır. Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojisi ile birlikte kullanılan duman detektörleri birbirlerine veri akışı gerçekleştirebilmektedir. Bu çalışmada IoT-Tabanlı iki farklı tür duman detektöründen toplanan veriler makine öğrenmesi algoritmaları kullanarak işlenmiştir. Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP), K-En Yakın Komşu (K-NN), Radyal Tabanlı Fonksiyon (RBF) Ağları, Naïve Bayes (NB), Karar Ağacı (DT), Rastgele Orman (RF) ve Lojistik Model Ağacı (LMT) algoritmaları kullanılmıştır. Duman detektörlerinden elde edilen veriler makine öğrenmesi algoritmalarında işlenerek yüksek başarıya sahip bir model tasarımı sağlanmıştır. Çalışma sonucunda hem kapalı alanlarda hem de dış mekanlarda oluşan yangınların erken tespitinin mümkün olacağı bir sistem tasarımı hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Makine öğrenmesi, Yangın tespit sistemi, IoT-tabanlı sistemler, K-katlı çapraz doğrulama

There have been numerous studies on disaster management and prevention in recent years [2-5]. Disasters pose a threat to human life and can result in the loss of lives and property if appropriate precautions are not taken. Among these disasters, fire is regarded as one of the most significant threats to human life and inhabited spaces [6]. If a fire is not detected early, it can cause extensive damage. Therefore, there have been many studies in the literature focusing on the early detection of fires [7-9]. These studies often revolve around smoke detection as a means to identify the onset of a fire. Smoke presence is typically determined either through image processing or by utilizing data obtained from smoke detectors [10-11]. Sensor-based methods detect changes in air temperature and smoke concentration to initiate early fire warnings. Automatic fire detection systems should be

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ahmetayranci58@gmail.com (A. A. Ayrancı)
Geliş / Received: 06.03.2024 Kabul / Accepted: 20.08.2024 Yayımlanma / Published: 15.10.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1444349

implemented to achieve faster detection and response to fires in indoor and outdoor areas. It is crucial to minimize false alarms in the fire detection system by considering various parameters. Information regarding fire incidents is collected using sensors or cameras.

There are two types of smoke detectors commonly used. These detectors are photoelectric smoke detectors and ionization smoke detectors. The features of these smoke detectors are explained in the following parts of the study. While detecting fire with smoke detectors, the source of the smoke must be determined correctly. False fire alarms can occur because smoke detectors have problems distinguishing whether the smoke source is a fire or another source [12]. To prevent false fire alarms, many parameters are used in the dataset to determine that the source of smoke is fire. False fire alarms cause time and financial losses. To avoid such losses, the fire detection system established must be reliable.

Seven classification algorithms were used for the analysis of the collected data: Multilayer Perceptron (MLP), Radial Basis Function (RBF) Network, k-Nearest Neighbor (k-NN), Naïve Bayes (NB), Decision Tree (DT), Random Forest (RF), and Logistic Model Tree (LMT). In the literature, Artificial Intelligence-based studies are becoming widespread in the early detection of disasters. Various Artificial Intelligence-based studies have also been conducted on fire detection systems. Image processing has been widely utilized in fire detection studies. In [13], the authors examined the color palette of the images captured from the suspected fire area for fire detection using the SVM algorithm. They employed the inter-frame technique to differentiate the suspected fire area from the background and extracted flame color moment features and texture features as inputs to the defined network. In the study presented in [14], the authors proposed the use of security camera systems in residential buildings for fire detection. They utilized Convolutional Neural Networks and Deep Learning to classify the images obtained from these camera systems. In [15], the authors investigated the combined use of image processing and sensor-based fire detection systems. They analyzed images captured from IP cameras along with data collected from smoke detectors, aiming to create a more reliable fire detection system. In [16], a fire detection system was designed using the Trend Predictive Neural Network model and data from multiple smoke detectors. The authors demonstrated that this model operated at a higher speed compared to conventional Neural Networks.

In this study, the Smoke Detection dataset, which was created by collecting data from IoT sensors in different fire scenarios, was used. The smoke Detection dataset includes 15 unique features derived from IoT smoke detectors. The 15 features represent collected sensor data, and 1 represents the classification result. These 15 features were reduced to 12 using data preprocessing steps. In this way, the aim is to make the model run faster and reduce the delay. The data were collected in fire scenarios occurring in open and closed areas. A comprehensive data set was created by collecting samples with a frequency of 1Hz under different fire scenarios. An artificial intelligence-based fire detection system can be developed using data collected in both indoor

and outdoor fire scenarios. The accuracy of the fire detection system has been investigated using classification ML algorithms on the dataset. Results show that the RF algorithm provides the highest fire detection performance with a high accuracy rate of 99.98%. The NB algorithm achieved the lowest accuracy of 79.2%. The RF algorithm combines multiple decision trees with ensemble learning.

2 Materials and methods

This section discusses IoT smoke detectors, features in the dataset, and data preprocessing steps. Also, information about the seven classifier ML algorithms used is explained.

2.1 Smoke detectors

Smoke detectors are electronic devices used to detect smoke for possible fires. It is used for early detection of fires and to prevent possible loss of life in work areas and settlements. Smoke detectors sense smoke, which is the most common indicator of fires. However, since not all smokes are a sign of fire, it is important to note more than one parameter in fire detection. There are two types of commonly used smoke detectors. These detector types are Photoelectric and Ionization smoke detectors. In the smoke detection dataset, a more successful fire detection system design aimed at combining data from many sensors with sensor fusion techniques.

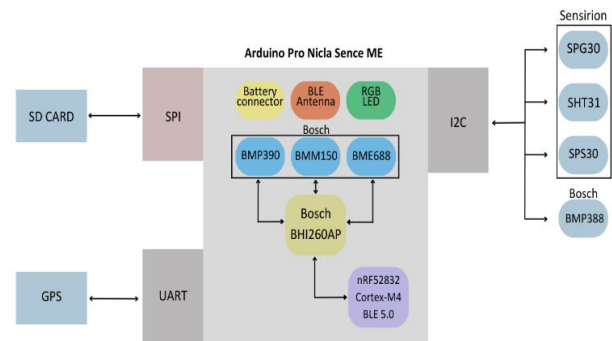


Figure 1. Block diagram of smoke sensor

In the smoke detection dataset, a more successful fire detection system design aimed at combining data from many sensors with sensor fusion techniques. Additionally, Bosch BMP388, Sensirion SPS30, Sensirion SHT31, Sensirion SPG30, and GPS sensors were used externally. The primary sensing component in the smoke detector is the Sensirion SPS30. The SPS sensor works similarly to photoelectric smoke detectors by measuring particles in the air. Particular matter (PM) in the dataset; PM1.0, PM2.5, and number concentration (NC): NC0.5, NC1.0, and NC2.0 outputs are given by the SPS sensor. Based on sensor fusion, the system is more cost-effective than the fire detection systems focused on image processing currently in use. Expected to have high performance, especially in indoor environments, it is anticipated to significantly enhance the performance of fire detection systems when used alongside existing systems at a low cost. The sensors utilized are highly affordable and accessible. The overall cost of the system is economical compared to a camera-based system.

A photoelectric smoke detector uses an infrared, ultraviolet, or visible light source to detect the presence of smoke. A photoelectric detector senses scattering light when the smoke enters the detector chamber and reaches the photosensor. The light emitted from the detector's photosensor is affected by the particles and dust in the smoke. The smoke detector generates an alarm when the light intensity coming from the photosensor falls below the specified threshold level. Photoelectric smoke alarms are usually more sensitive to smoldering fires.

An ionization smoke detector contains a small amount of radioactive material between two electrically charged planes. These detectors ionize the air using the radioactive material they have. The ionized air causes the electric current to flow between the plates. If the smoke comes into the detector chamber, the electric current flow is disturbed, and the detector starts to sound the alarm. Ionizing smoke detectors are often more sensitive in detecting flaming fires.

2.2 Dataset information

In this study, the Smoke Detection dataset created with the help of IoT smoke detectors was used. It is aimed to design an AI-Based IoT fire detection system using the smoke detector dataset shared over the Kaggle data repository [17]. The dataset contains 16 features, and these features are all numeric. These data in the dataset were collected under different fire scenarios from IoT smoke detectors. Three of these features do not affect the model. These features are timestamp, index and index count. The features that had no impact on the models were removed from the dataset through feature reduction method.

Since the index and index count variables specify the same property, both variables are excluded from the dataset. Also, the timestamp variable has a low weight on the models. There is no missing data in the dataset. The dataset contains information about air temperature, humidity, amount of CO₂, organic compounds, and other gases. Five records are given in Table 1 to clarify the dataset. The 13 features used in the dataset show the air temperature, air humidity (%), volatile organic components (ppb), eCO₂ concentration (ppm), Raw H₂, Raw Ethanol, Air Pressure (hPa), Particle size, and particle concentration. In the fire, class used as output data, "0" indicates no fire, and "1" indicates fire. Fire indicates the output variable in the data set. The distribution of fire variable samples in the dataset is shown in Figure 1.

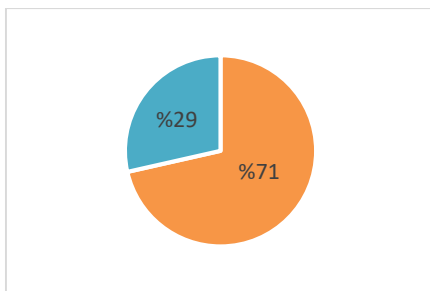


Figure 2. Distribution of fire feature in the dataset

There are 44757 fire and 17873 no fire examples in the fire variable used as the classifier variable. As given in

Figure 1, the distribution in the dataset indicates %71 fire class and %29 no fire class. Ideally, the two classes should have equal amounts of data. Class imbalance is a common problem in many real-world datasets where the number of samples in one or more classes is much smaller than the others. To address this issue, two widely used techniques are undersampling and oversampling. Undersampling involves reducing the size of the majority class(es) to match the size of the minority class(es), while oversampling involves increasing the size of the minority class(es) to match the size of the majority class(es).

Undersampling can be advantageous for machine learning models that are sensitive to class imbalance, as it helps create a more balanced dataset, thereby potentially improving their performance. However, undersampling can also lead to the loss of valuable information and may not work well if the majority class(es) are already sparse. On the other hand, oversampling can improve the representation of the minority class(es) in the dataset, which can lead to better classification accuracy and generalization performance of machine learning models. Various oversampling methods have been proposed, including the synthetic minority oversampling technique (SMOTE), which creates new synthetic samples for the minority class(es) based on nearest-neighbor interpolation. However, it is important to note that oversampling can potentially introduce noise or bias into the dataset if the artificially generated samples do not accurately represent the underlying distribution of the minority class(es). The study did not employ undersampling or oversampling techniques for the fire detection task, as the researchers considered the amount and quality of the available data to be important factors. Additionally, the researchers decided against generating synthetic data due to concerns about potential impacts on the results.

2.3 Data preprocessing

Data preprocessing is the process of preparing raw data and fitting it into an ML model. Data preprocessing converts the dataset into a suitable format to work on. It is the first process to do when creating an ML model. Performing this process correctly ensures the model works with high performance. It is desired that the dataset used while ML modeling is clean and there are no outliers [18]. Otherwise, obtaining optimum performance in the modeling will not be possible.

Removing null and unnecessary data from the dataset can enhance the speed and effectiveness of ML models. While determining which data to clean, the impact of each variable on the output is carefully assessed. Fortunately, the dataset utilized in this study does not contain any null data. While the original dataset consisted of 16 variables, two of them, namely CNT and index, were excluded through data preprocessing as they did not contribute significantly to the dataset. This decision was based on the realization that CNT and index represented the same counting operation, resulting in redundant data. As a result, these variables were eliminated, resulting in a streamlined dataset.

Table 1. 5 example data from the dataset

Temperature	Humidity	TVOC	eCO2	H2	Ethanol	Pressure	PM1.0	PM2.5	NC0.5	NC1.0	NC2.5	Fire
22.105	54.36	32	437	12552	19637	939.809	0.0	0.01	0.01	0.012	0.006	0
22.725	54.45	18	400	12593	19669	939.806	0.18	0.4	0.67	0.448	0.214	0
17.38	53.66	6	400	13195	20120	939.62	0.79	0.83	5.47	0.853	0.019	0
9.829	49.86	1320	404	12992	19404	938.814	1.75	1.82	12.04	1.877	0.042	1
26.29	50.77	1258	400	12999	19415	928.862	1.87	1.94	12.88	2.009	0.045	1

2.4 Classification algorithms

Classification algorithms assign the output feature to one of the specified classes based on the inputs in the dataset. In this study, fire detection analysis was performed by processing 13 feature in the dataset. Seven classification algorithms were used for the Artificial intelligence-based fire detection system. These algorithms are Multi-Layer Perceptron (MLP), k-Nearest Neighbor (k-NN), Radial Basis Function (RBF), Naïve Bayes (NB), Decision Tree (DT), Random Forest (RF), and Logistic Model Tree (LMT).

K-fold cross-validation is applied to the study to ensure unbiased observations. It is a data partitioning strategy to ensure model performance. The cross-validation technique divides the dataset into k parts. In the k-fold cross-validation technique, k-1 folds are used for training, and one-fold is used for performance evaluation in the model. To make unbiased observations dataset was divided randomly. Choosing a k number high in the k-fold cross-validation technique makes it easier to design an unbiased model [19]. However, choosing the k number high increases the computational complexity and causes slower modeling.

Hyperparameter optimizations were conducted to fine-tune various parameters in the classification algorithms. For instance, in the Random Forest (RF) algorithm, the "total number of trees" was tuned to achieve optimal performance. Similarly, the k parameter that shows the number of neighbors in the K-NN algorithm was adjusted to find the most suitable value. In the case of the Multilayer Perceptron (MLP) algorithm, the "hidden layer number" was optimized to enhance the model's effectiveness. These hyperparameter optimizations aimed to maximize the accuracy and overall performance of the classification algorithms.

2.4.1 Multi-layer perceptron

MLP is one of the basic algorithms widely used in classification problems. As the name indicates, it is an artificial neural network algorithm consisting of many layers. The MLP algorithm consists of an input layer, an output layer, and one or more hidden layers. The MLP algorithm can also work on complex datasets using non-linear functions [20].

The input data is fed into the input layer of the MLP model. Within this layer, the data is processed and transmitted to the hidden layer using activation functions for preprocessing. The sigmoid function generally uses as an activation function. The number of hidden layers in the MLP structure is determined as a parameter and can be selected as single or multiple layers. The data flows from the input layer

to the output layer, resembling a feed-forward network. During this process, weights are assigned to each data point using the designated activation functions. The backpropagation learning algorithm is used to train MLP neurons. This learning algorithm works by testing backward errors starting from the output nodes [21].

MLP is one of the classifier algorithms where hyperparameter tuning has a significant impact. The number of hidden layers, momentum, and learning rate parameters are the main optimized parameters in the MLP algorithm. Hyperparameter optimization has a significant impact on the MLP algorithm. Although the MLP algorithm seems to have a simple structure, it needs a lot of time in the modeling and training phases. In MLP, the testing phase takes less time. The hidden layer and the number of neurons determine the complexity and speed of the algorithm. The accuracy of the model can be increased by optimizing the parameters in the algorithm structure.

2.4.2 K-nearest neighbor

K-NN, initially introduced by Fix and Hodges in 1951 for pattern problems, was further developed by Cover and Hart in 1967 [22]. It is a straightforward machine learning algorithm known for its simplicity and interpretability. Due to its uncomplicated structure, K-NN finds application in both classification and regression problems. K-NN is classified as a supervised learning algorithm, but it distinguishes itself from other ML algorithms by not having a dedicated training stage. As a result, K-NN is considered a lazy learning algorithm, relying on memorization rather than conventional learning methods.

The K-NN structure predicts the class of a given data sample based on the concept of feature similarity. This similarity is determined by selecting the value of k, which is a crucial factor influencing the accuracy of the K-NN model. In the K-NN model k parameter specifies the number of nearest neighbors to check. It is essential to carefully choose the value of k to prevent overfitting or misclassification. Selecting a small k value may lead to overfitting while choosing a large k value increases the risk of misclassification. Therefore, determining the optimal k value is crucial in the K-NN structure. Depending on the problem at hand, a higher k value is preferred to reduce overall noise. However, as the k increases, the probability of misclassification also rises. To determine the optimal k number cross-validation method can be utilized. In this study, a k value of 3 was selected as the optimal parameter.

Euclidean and Manhattan distance functions are widely used while calculating the distance in the K-NN structure.

The average value is assigned to the unknown nodes when using the Euclidean distance function. The Euclidean distance function tries to predict missing nodes from neighboring node values. The formula for the Euclidean distance function is given below.

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (1)$$

In Equation (1), n represents number of data points, d represents distance, x_i indicates the incoming data, and y_i indicates the selected data. In the Manhattan distance formula, the distance between two nodes is the sum of the absolute value of the difference in the cartesian coordinates. The Manhattan distance formula is defined in Equation (2).

$$d(x, y) = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (2)$$

Manhattan distance formula uses same abbreviations with Euclidean distance formula. In Equation (2), n represents number of data points, d represents distance, x_i indicates the incoming data, and y_i indicates the selected data. Euclidean and Manhattan distance functions can be used for continuous data. If the dataset consists of categorical data, Hamming distance function should be used. In case of numerical and categorical data exist together, then numerical data should be standardized.

2.4.3 Radial basis function

RBF network is an Artificial Neural Network (ANN) developed by Moody and Darken in 1989 [23]. The design of the RBF network was inspired by biological nerve cells. RBF networks, which are artificial neural networks model, have a different structure from other artificial neural network models. In comparison to other artificial neural networks, RBF networks have a different structure. RBF networks have an input layer, a single hidden layer, and an output layer. The point that distinguishes RBF networks from other artificial neural networks is the operation happens in this single hidden layer. The data converted to feature vectors in the hidden layer are extracted to higher dimensions with the help of non-linear transfer functions. Then the classification process is performed in the output layer.

2.4.4 Naïve bayes

Naïve Bayes (NB) classifier is a mathematical ML algorithm based on conditional probabilities in estimation. As mentioned in the name of the algorithm, it is based on the Bayesian formula used in conditional probability calculations [24]. NB classifier can do both numerical and categorical classification. NB provides high accuracy in complex classification problems. The main advantages of the algorithm are that it can quickly model complex problems and require very little data for training. NB calculates the probability of each state for an element and classifies it according to the highest probability value. Algorithm considers each feature in the dataset as independent from the other. Since the features are assumed to be independent of each other, the relations between the variables cannot be modeled.

One of the crucial problems with the NB algorithm is zero frequency. It means that the desired sample from the model cannot be found in the dataset. Zero frequency occurs when any condition having zero probability in the whole multiplication of the likelihood makes the complete probability zero. The simplest way to solve this is to eliminate this possibility by adding the minimum value to all values. This solution is called the Laplace Estimator.

2.4.5 Decision tree

DT is an ML algorithm widely used in both classification and regression problems in supervised learning. DT is a simple algorithm that applies some rules when making decisions. Tree-based ML algorithms are the most widely used supervised learning algorithms. The DT algorithm can be used for classifying both numerical and categorical data. The structure of DT is similar to the thought system of people. DT algorithm defines the dataset by dividing it into small decision nodes. A set of rules is applied at the decision nodes to create a structure that divides into different branches [25].

The first node in the algorithm is called the root node. From this node, the downstream decision nodes are designed then the leaf nodes follow. The DT algorithm is structurally in the form of a tree, and probabilities of all classification sets are defined in its branches. Leaf nodes are the final decision points in the DT algorithm. Splitting the data in the DT algorithm has a significant impact on the accuracy of the model. As a result of dividing the data into sub-nodes, the model becomes more homogeneous. DT uses various techniques to split a decision node into two or more nodes. The most used techniques in the DT algorithm are entropy and information gain. Entropy can be defined as a measure of randomness and uncertainty. If the samples are ordered and homogeneously separated, the entropy is zero. Therefore, it is desirable to arrange the data in such a way that the entropy is minimal. Information gain is subtracting all entropy after dividing a dataset over a feature. The importance of the feature increases if the entropy value is small.

2.4.6 Random forest

In 2001 Leo Breiman developed Random Forest (RF) algorithm [26]. It utilizes an ensemble learning technique that combines many classifiers to solve complex problems. RF algorithm contains many decision trees in its structure. As the number of decision trees used in the algorithm increases, the possibility of creating a more successful model increase. One of the important differences between it and the DT algorithm is that finding the root node and splitting the nodes in the RF algorithm is random. This way, there is no need to use entropy and information gain techniques.

Overfitting, which is the most significant problem of DT, decreases in the RF classifier. RF eradicates the limitations of the DT algorithm. It reduces the overfitting of datasets and increases accuracy. Overfitting can be overcome by using enough decision trees in the RF algorithm. Another advantage of the RF algorithm is that it displays the weights of the classes. RF needs less data and preparation time for training. It is also successful on datasets with noisy and

outlier samples. The RF algorithm utilizes the GINI index to assess the effectiveness of trees and branches, which measures the success rates of the samples assigned to each node. A low GINI index value indicates the homogeneous distribution of the dataset and the successful creation of branch nodes. The GINI index in the RF algorithm is used similarly to the information gain technique in the DT algorithm [27].

RF is a very suitable algorithm for hyperparameter optimization. It has several hyperparameters to be set. These parameters are the number of trees, the number of random features, the number of nodes, and the splitting rule. The high number of trees enables to build of a successful model. The selection of the number of random features is one of the most crucial parameters. This hyperparameter is hard to pick without experimenting. Choosing a low number of features means that fewer features are considered when splitting data. Adjusting the number of nodes influences reducing overfitting in the model. RF uses GINI and Entropy techniques for data splitting. Hyperparameter tuning is essential for RF algorithms.

2.4.7 Logistic model tree

Logistic Model Tree (LMT) is a supervised learning algorithm classification model. It has high accuracy in binary and multiple classification problems. LMT combines the features of Logistic Regression (LR) and DT algorithms. Unlike the decision trees method, the leaf nodes in the LMT algorithm have logistic regression functions of related attributes as well as class labels [28]. Logit Boost enables leaf nodes to utilize logistic regression functions. However, logistic regression has a complex structure. Due to its complex structure, the construction of the tree model takes time.

2.4.8 K-fold cross validation

In classification problems, the initial step is to divide the dataset into training and testing sets. It is crucial to be aware that challenges may arise during this process of splitting the dataset into training and testing sets. One potential issue is the uneven distribution of classes, which can lead to a biased model. The K-fold cross-validation technique's goal is to create unbiased observation sets. K-fold cross-validation divides the dataset into k sets [29]. In K-fold cross-validation, all subsets are treated as equal in terms of size and quality. One of the divided subsets is designated as the test set, while the remaining k-1 subsets are used for training the data. This validation process is repeated k times, with each subset taking turns as the test set.

Increasing the number of k in the K-fold cross-validation technique increases the possibility of creating an unbiased model. However, increasing the k number also causes a loss of computation and time. Using more than one k value provides us to see the performance of the k-fold cross-validation technique. Thus, it is possible to find the optimum value of k. As a result of K-fold cross-validation, the success of the designed model can be seen by examining the performance metrics. K-fold cross-validation shows unbiased prediction accuracy. Cross-validation can be utilized to identify the presence of overfitting in a model.

3 Performance evaluation

A classification study was conducted on the Smoke Detection dataset using the Python 3.11 program. The study utilized seven machine learning classifier algorithms. The main objective of this research was to create an efficient fire detection system by implementing ML algorithms on the data collected from IoT smoke detectors. The performance of the designed system was evaluated using various ML performance metrics.

3.1 Performance metrics

In this section, we will provide a brief explanation of the performance metrics used to evaluate the performance of the models employed. Performance metrics have a significant role in assessing the effectiveness of ML models. These metrics are utilized to measure the success of classifier models on the dataset. The primary performance metrics employed in classifiers include accuracy, precision, recall, F-score, and kappa statistics. These metrics indicate the percentage of correct classification predictions made by the model. When evaluating the performance of the classifier, key parameters to consider are True Positive (TP), True Negative (TN), False Positive (FP), and False Negative (FN). These parameters are essential for assessing both performance and error metrics accurately.

3.1.1 Accuracy

The most crucial performance metric in classification problems is accuracy, which indicates the rate of correct classifications. Accuracy measures not only TP classifications but also TN classifications [30]. It can be succinctly stated as the correct classification divided by the total classification. Equation (3) states the accuracy value of the model.

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (3)$$

Accuracy is the first performance metric to look at in classification problems. Higher accuracy value usually indicates the model's success. In some cases, achieving high accuracy values can be attributed to overfitting. In such situations, it is essential to examine the presence of overfitting.

3.1.2 Precision

Precision is a performance metric employed in both classification and regression problems. It reflects the accuracy of correctly made classifications. Precision is a metric that measures the ratio of TP samples to all positive samples. Precision measures the positive classification success of the model. It can be obtained as shown in Equation (4).

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (4)$$

Precision has a significant impact when examining the performance of the model. TP samples are important for the fire detection system designed in this study. When the FP classification rate is high, the fire alarm may activate in the

absence of fire, causing unnecessary panic and disruption in both living and working areas. Also, it may cause a waste of time and intervention to other possible fires by the firefighters in charge of fire extinguishing. Because of this, the Precision metric wanted to be as high as possible in the model created.

3.1.3 Recall

Recall indicates how accurately the positive samples were measured. The recall metric has similarities with the precision metric. Precision and recall are performance metrics used for pattern recognition and classification in machine learning. These performance metrics are crucial for building a good ML model. When determining the recall of a model, it focuses solely on positive values while ignoring negative values. The recall metric reveals the effectiveness of correctly classifying instances in all fire-related scenarios. Recall can be calculated using Equation (5).

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (5)$$

Recall helps us to see how accurately the relevant data in the dataset is classified. The recall metric demonstrates the accuracy of the fire alarm activation in the event of a fire. In this study, it can be stated that recall is the most critical performance metric, as it reflects the accuracy in fire-related cases.

3.1.4 F-score

The F-score metric is used to measure the accuracy value of the classifier model. The F-score metric uses precision and recall. Since these two metrics are not comprehensive on positive classifications, we can examine positive classified samples with the F-score metric. F-score takes the harmonic average of precision and recall metrics. The F-score can be found using Equation (6).

$$F - Score = \frac{Precision * Recall}{Precision + Recall} \quad (6)$$

F-score has the same weight as it is the average of the precision and recall metrics.

3.1.5 Kappa statistics

Kappa statistics works similarly to the accuracy metric in the classification model. It is used especially in multi-classification models because accuracy, precision, and recall metrics do not represent the model comprehensively. This metric works on a probability basis. The Kappa statistic value is calculated based on expected and observed probabilities. The value of the Kappa metric is one or less than one. A Kappa value close to 1 indicates that the model is successful. In general, kappa values exceeding 0.75 indicate a successful model, while values close to 0 suggest an unsuccessful model. If the Kappa value is 0 or less than 0, it is assumed that there is a random relationship between the raters, and the model is considered unsuccessful.

3.2 Error metrics

Error metrics are used for identifying failed classifications made by the model. To analyze the classification accuracy of the model, we should also investigate misclassifications. The error performance of the models was analyzed by examining the Mean Absolute Error (MAE) and Root Mean Square Error (RMSE) metrics.

3.2.1 Mean absolute error

Mean Absolute Error (MAE) is a metric that measures the errors that occur in the model statistically. The MAE error level is directly related to the accuracy of the model. It shows the average difference between the true value of the classified variable and the predicted variable. MAE is more robust towards outliers than RMSE metrics since the changes in MAE are linear and, therefore intuitive [31]. While MSE and RMSE metrics perform better against large-scale errors, MAE analyzes errors linearly, so there is no performance change based on error level. The MAE provides a measure of the model's ability to predict actual values. A lower MAE indicates higher accuracy, while a higher MAE indicates lower accuracy. The MAE is a useful metric due to its simplicity and comparability across different models. However, it has a limitation in that it treats all errors equally, regardless of their magnitude. It means that both large and small errors carry the same weight in the calculation. For certain applications, this may not be desirable, and alternative metrics like the Root Mean Squared Error (RMSE) may be more suitable.

3.2.2 Root mean square error

The Root Mean Square Error (RMSE) measures the standard deviation of the error, providing insight into the dispersion of values. The standard deviation is employed in classifiers to detect outliers. When evaluating error performance, the RMSE value is utilized. To obtain the RMSE value, the variance value must first be determined, which represents deviations from the mean. The RMSE value is obtained by taking the square root of the calculated variance value. It is also equivalent to the square root of the Mean Square Error (MSE) metric. In ML models, the deviation of data from the mean line is utilized instead of variance. RMSE metric is employed to assess performance in both classification and regression models. A smaller RMSE value indicates a better-performing classification model, signifying a stronger fit of the model to the data.

3.3 Classification model's performance

A fire detection system has been designed with ML algorithms in IoT-based smoke detectors. The performance of accuracy, recall, and precision metrics in the ML models is significant for the system.

To the authors' knowledge, there is no study yet using this dataset. In this study, seven ML models were tested on the dataset using the Python Jupyter Notebook environment. While testing the models, the dataset was randomly divided into 80% training and 20% testing data. The dataset was divided in this ratio to obtain the most optimal result. Accuracy, Precision, and Recall results obtained in the models are given in Table 2.

Table 2. Accuracy, precision, and recall results of algorithms

Algorithms	Accuracy	Precision	Recall
MLP	96.02	93.00	96.00
K-NN	97.87	97.90	98.00
RBF	86.93	87.70	87.00
NB	81.50	82.40	81.50
DT	99.76	99.80	99.90
RF	99.98	99.90	100
LMT	98.95	99.00	99.00

The models' accuracy, precision, and recall values are shown in the Table 2. The results show that tree-structured algorithms perform better than other classifier models. The performance results of the models also show that the dataset is suitable for the used models. The RF model achieved the highest classification performance. Also, DT and LMT algorithms achieved similar performance to the RF model. This proves the suitability of tree classifier algorithms for the dataset. F-score and Kappa statistic metrics were also examined while comparing the performance of the models. These performance metrics verify the relative weight of precision and recall metrics and the quality of the model. F-score and Kappa statistic values of the algorithms are given in Table 3.

Table 3. F-score and kappa statistic results of algorithms

Algorithms	F-score	Kappa statistics
MLP	98.00	97.17
K-NN	99.15	97.90
RBF	89.20	72.90
NB	79.20	57.70
DT	99.88	99.82
RF	100	99.98
LMT	99.90	99.75

The results of the performance metrics for the designed models are presented in Table 2 and Table 3. The findings indicate that tree-based algorithms demonstrate high performance, while the NB algorithm exhibits the lowest model performance. However, despite its lower performance, the NB algorithm still achieves a high accuracy of 81.5%, suggesting its usability. Figure 3 provides a

graphical representation of the accuracy, precision, and recall metric values for the models.

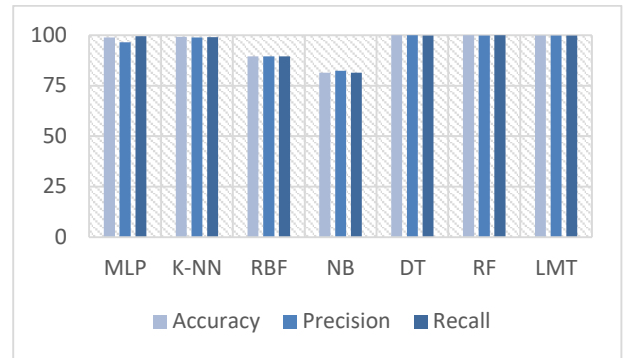


Figure 3. Performance metrics values of models

Error performance metrics in machine learning are crucial for assessing and improving the accuracy and robustness of models. These metrics provide quantitative measures of a model's prediction errors. These performance metrics are crucial for evaluating the effectiveness of designed ML models. When investigating the accuracy of the models, it is necessary to examine the performance metrics and error metrics together. Two error metrics were assessed to determine the rates of unsuccessful classification and which class had more classification errors. This study examines the MAE and RMSE error metrics to show the error performance of the models. Table 4 shows the MAE and RMSE values of the algorithms.

Table 4. Error performance of algorithms

Algorithms	MAE	RMSE
MLP	4.95	16.10
K-NN	2.40	12.50
RBF	18.10	29.75
NB	21.10	41.50
DT	0.08	0.18
RF	0.02	0.32
LMT	0.03	0.827

Table 4 indicates the error performance of the used algorithms. It is seen that tree-structured algorithms exhibit higher error performance.

Table 5. Accuracy values obtained using the K-fold cross-validation.

Algorithms	K=2	K=3	K=4	K=5	K=6	K=7	K=8	K=9	K=10
MLP	95.56	95.90	96.00	96.50	96.30	96.58	96.15	95.75	96.40
K-NN	97.65	97.85	98.00	98.00	98.10	98.15	98.15	98.20	98.10
RBF	87.50	86.50	86.10	87.40	88.15	86.70	87.65	87.00	87.00
NB	78.20	78.40	78.25	78.30	78.25	78.20	78.00	77.90	77.50
DT	99.84	99.86	99.89	99.90	99.97	99.95	99.98	99.97	99.95
RF	99.90	99.92	99.94	99.95	99.97	99.98	99.99	99.98	99.95
LMT	99.70	99.50	97.50	97.90	98.40	99.00	99.50	97.90	97.50

Since the tree-structured algorithms have better performance than other algorithms, the error performance of these algorithms is also expected to be higher than others. RF achieved the highest error performance among the used models, and NB showed the lowest error performance.

3.4 K-fold cross validation results

This section presents the test results using the K-Fold cross-validation technique to assess the performance of the models. The performance of the models was evaluated for various k parameters. Table 5 displays the accuracy values obtained from the k-fold cross-validation technique across different k parameters. Upon analyzing the results of the k-fold cross-validation, it can be inferred that the dataset exhibits independence and lack of bias. The results indicate that RF algorithms achieve the highest performance, whereas NB algorithms exhibit the lowest. These findings align with the results obtained from the model created by partitioning the dataset into train and test sets.

4 Results and discussion

This study aims to design a system that can detect fires early using AI-based IoT smoke detectors. It includes an examination of the dataset derived from IoT smoke detectors, followed by the application of data preprocessing steps. Data preprocessing steps were applied dataset to evaluate the quality of the data. Three features that do not affect the models are removed for faster processing speed and less complexity on the model. There is no missing data. The data values in the attributes shows a balanced distribution.

To the best of the authors' knowledge, the Smoke Detection dataset used in the study has not yet been used in any other studies in the literature. Therefore, we evaluated studies on similar datasets to analyze the study's performance improvement. In [15], the authors gathered data from various sensors and conducted a study on fire detection using Trend Predictive Neural Network (TPNN) and MLP algorithms. The TPNN algorithm achieved the highest accuracy of 99.7%. In our research, 99.98% accuracy is obtained with the RF algorithm. The training time of the RF model was seen as 1 second, while the testing time of the model was 0.02 seconds. The results obtained indicate that the models are appropriate for real-time usage.

This study aimed to achieve early fire detection by applying seven classification algorithms to a smoke detection dataset. The results demonstrate that the RF algorithm achieved the highest level of success, while the NB algorithm displayed the lowest performance. These findings hold significant implications for the design and implementation of IoT-based smoke detectors, indicating that ML models can improve accuracy and reliability. Upon thorough examination of the results, it becomes evident that AI-based fire detection systems have the potential to facilitate the early identification of fires, mitigating the potential for extensive damage in both indoor and outdoor environments. Implementation of such systems can effectively minimize the impact on human life and the environment. Future research endeavors will incorporate

visual sensors in conjunction with smoke detectors to enhance reliability and precision. By integrating data from both smoke detectors and cameras and leveraging sensor fusion algorithms, it becomes feasible to develop a system that ensures more dependable and timely fire detection.

Conflict of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity Rate (iThenticate): 12%

References

- [1] K. Mehta, S. Sharma, and D. Mishra, Internet-of-Things enabled forest fire detection system, 2021 Fifth International Conference on I-SMAC (IoT in Social Mobile Analytics and Cloud), pp. 20-23, Palladam, India, 2021.
- [2] J. Lu, J. Guo, Z. Jian, X. Xu, Optimal Allocation of Fire Extinguishing Equipment for a Power Grid Under Widespread Fire Disasters, IEEE Access, vol.6, pp. 6382-6389, 2018. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2788893>.
- [3] Y. Hirohara, T. Ishida, N. Uchida and Y. Shibata, Proposal of a Disaster Information Cloud System for Disaster Prevention and Reduction, WAINA 2017, pp. 664-667, 2017.
- [4] Ö. Doğan, O. Şahin, and E. Karaaslan, Digital twin based disaster management system proposal: DT-DMS. Journal of Emerging Computer Technologies, 1(2), 25-30, 2021.
- [5] E. N. Soysal, H. Gürkan, and E. Yavşan, IoT Band: A wearable sensor system to track vital data and location of missing or earthquake victims. International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering, 9(3), 213-218, 2023. <https://doi.org/10.22399/ijcesen.1317040>.
- [6] J. Qiu, J. Wang, T. He, B. Chen and X. Chen, Research on intelligent fire rating evaluation and rapid rescue plan optimization strategy, 2020 International Conference on Urban Engineering and Management Science (ICUEMS), pp. 446-453, 2020.
- [7] K. Muhammad, J. Ahmad, Z. Lv, P. Bellavista, P. Yang, and S. W. Baik, Efficient deep CNN-based fire detection and localization in video surveillance applications. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 49(7), 1419-1434, 2018. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2018.2830099>.
- [8] A. Sungeetha and R. Sharma, Real time monitoring and fire detection using internet of things and cloud based drones. Journal of Soft Computing Paradigm (JSCP), 2(03), 168-174, 2020. <https://doi.org/10.36548/jscp.2020.3.004>.
- [9] A. F. Önal, B. Ulver, A. Durusoy, and Erkmén, B., Intelligent wireless sensor networks for early fire warning system. Electrica, 2020. <https://doi.org/10.26650/electrica.2019.19019>.
- [10] T. Çelik, H. Özkaramanlı, and H. Demirel, Fire and smoke detection without sensors: Image processing

- based approach, 2007 15th European Signal Processing Conference, pp. 1794-1798, 2007.
- [11] F. M. A. Hossain, Y. Zhang, C. Yuan, and C. Y. Su, Wildfire flame and smoke detection using static image features and artificial neural network, 2019 1st International Conference on Industrial Artificial Intelligence (IAI), pp. 1-6, 2019.
- [12] K. Chen, Y. Cheng, H. Bai, C. Mou and Y. Zhang, Research on image fire detection based on support vector machine, 2019 9th International Conference on Fire Science and Fire Protection Engineering (ICFSFPE), pp. 1-7, 2019.
- [13] N. A. Mwedzi, N. I. Nwulu and S. L. Gbadamosi, Machine learning applications for fire detection in a residential building, 2019 IEEE 6th International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS), pp. 1-4, 2019.
- [14] N. Chowdhury, D. R. Mushfiq and A. E. Chowdhury, Computer vision and smoke sensor based fire detection system, 2019 1st International Conference on Advances in Science, Engineering and Robotics Technology (ICASERT), pp. 1-5, 2019.
- [15] M. Nakip and C. Güzelış, Multi-sensor fire detector based on trend predictive neural network, 2019 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), pp. 600-604, 2019.
- [16] M. Nakip, C. Güzelış and O. Yildiz, Recurrent Trend predictive neural network for multi-sensor fire detection, in IEEE Access, vol. 9, pp. 84204-84216, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3087736>.
- [17] Kaggle. Smoke Detection Dataset. Available from: <https://www.kaggle.com/datasets/deepcontractor/smoke-detection-dataset> September 04, 2022.
- [18] A. A. Ayrancı, S. Atay and T. Yıldırım, Speaker accent recognition using machine learning algorithms, 2020 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU), pp. 1-6, Istanbul, Turkey, 2020. <https://doi.org/10.1109/ASYU50717.20.20.9259902>.
- [19] J. D. Rodriguez, A. Perez and J. A. Lozano, Sensitivity analysis of k-fold cross validation in prediction error estimation in IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, vol. 32, no. 3, 569-575, 2010. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2009.187>.
- [20] F. Murtagh, Multilayer perceptrons for classification and regression, Neurocomputing, 2(5-6), 183-197, 1991.
- [21] M. K. Alsmadi, K. B. Omar, S. A. Noah and I. Almarashdah, performance comparison of multi-layer perceptron (back propagation, delta rule and perceptron) algorithms in neural networks, 2009 IEEE International Advance Computing Conference, pp. 296-299, Patiala, India, 2009.
- [22] T. Cover and P. Hart, Nearest neighbor pattern classification, in IEEE Transactions on Information Theory, vol. 13, no. 1, pp. 21-27, January 1967. <https://doi.org/10.1109/TIT.1967.1053964>.
- [23] J. Moody and C. J. Darken, Fast learning in networks of locally-tuned processing units, Neural computation, vol. 1, no. 2, pp. 281-294, 1989. <https://doi.org/10.1162/neco.1989.1.2.281>.
- [24] R. Irina. An empirical study of the naive Bayes classifier. In IJCAI 2001 workshop on empirical methods in artificial intelligence, vol. 3, no. 22, pp. 41-46, 2001.
- [25] S. R. Safavian, and D. Landgrebe, A survey of decision tree classifier methodology. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, 21(3), 660-674, 1991. <https://doi.org/10.1109/21.97458>.
- [26] L. Breiman, Random forests. Machine learning, 45(1), 2001. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2494502>.
- [27] H. Han, X. Guo, and H. Yu, Variable selection using mean decrease accuracy and mean decrease gini based on random forest. In 2016 7th IEEE international conference on software engineering and service science, pp. 219-224, 2016.
- [28] D. L. Gupta, A. K. Malviya, and S. Satyendra, Performance analysis of classification tree learning algorithms. International Journal of Computer Applications, 2012. https://doi.org/10.1007/978-3-319-03844-5_9.
- [29] J. D. Rodriguez, A. Perez, and J. A. Lozano, Sensitivity analysis of k-fold cross validation in prediction error estimation. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 32(3), 569-575, 2009. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2009.187>.
- [30] S. Garcia, A. Fernández, J. Luengo, and F. Herrera, A study of statistical techniques and performance measures for genetics-based machine learning: accuracy and interpretability. Soft Computing, 13, 959-977, 2009. <https://doi.org/10.1007/s00500-008-0392-y>.
- [31] T. Chai, and R. R. Draxler, Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE) Arguments against avoiding RMSE in the literature. Geoscientific model development, 7(3), 1247-1250, 2014. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>.





Lityum-İyon pilin anlık gerilim, akım, güç ve sıcaklık değerlerinin Arduino üzerinden C# programlama dilinde elde edilen verilere dayalı olarak analiz edilmesi

Analyzing instantaneous voltage, current, power, and temperature values of a Lithium-Ion battery based on data obtained via Arduino in C# programming language

Sercan Taşdelen¹ , Batuhan Gökkuş² , Sezer Ulukaya^{3,*} 

^{1,2,3} Trakya Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 22030, Edirne Türkiye

Öz

Lityum-iyon piller, geniş bir kullanım alanına sahiptir. Elektrikli araçlar, taşınabilir elektronik cihazlar, enerji depolama sistemleri ve tıbbi cihazlar bu geniş yelpazede yer alan başlıklardan bazılarıdır. Bu tür uygulamalarda lityum-iyon pillerin güvenliğini ve performansını izlemek, kullanım ömrünü artırmak ve olası sorunları önceden tespit etmek önemlidir. Çalışmamız, bu ihtiyaca cevap vermek için 18650 3.7V lityum-iyon pil kullanılarak tasarlanmıştır. Bu makalede, lityum-iyon pillerin yük altındayken anlık voltaj, akım, güç ve sıcaklık değerlerini sensörler aracılığıyla toplayan ve Arduino mikrodenetleyici ve C# programlama dili kullanılarak görselleştirme sağlayan bir arayüz sunulmaktadır. Bu çalışmanın amacı, lityum-iyon pillerin performansını izlemek ve potansiyel aşırı yüklenme veya aşırı ısınma durumlarını tespit edebilmektir. Sensörler aracılığıyla elde edilen veriler, devrede yer alan mikrodenetleyici üzerinde işlenir ve C# programlama dili kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılır. Bu veriler, radyal göstergeler aracılığıyla kullanıcıya görsel olarak sunulur. Ayrıca, uzun şarj ve deşarj sürelerinin kestirimi için Python programlama dili ile bağlantı modelleri kullanılmıştır. Makalenin ilerleyen bölümlerinde, çalışmanın tasarımı, kullanılan donanım ve yazılım bileşenleri ile elde edilen sonuçlar ayrıntılı bir şekilde açıklanmaktadır. Sonuçlar, lityum-iyon pillerin gerçek zamanlı izlenmesi ve güvenliğinin sağlanması için bu tür bir yaklaşımın etkinliğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Lityum-iyon pil, Arduino, C#, Polinom bağlantı, GUI tasarımı

1 Giriş

Günümüzde, çevre dostu ve sürdürülebilir cihaz sistemlerine olan talep artmaktadır. Elektrikli cihazların birçoğunun güç kaynağı lityum-iyon pillerdir. Bu piller, yüksek enerji yoğunluğu, hafiflik, düşük kendiliğinden deşarj oranı ve uzun ömür gibi avantajlara sahiptir [1]. Ancak, bu pillerin güvenliği ve performansı doğru şekilde kontrol edilmediği takdirde risk oluşturabilir. Bu nedenle, pil

Abstract

Lithium-ion batteries have a wide range of usage. Electric vehicles, portable electronic devices, energy storage systems and medical devices are some of the topics in this wide range. In such applications, it is important to monitor the safety and performance of lithium-ion batteries, increase their lifespan and detect potential problems in advance. Our study was designed using 18650 3.7V lithium-ion battery to meet this need. In this article, an interface is presented that collects instantaneous voltage, current, power and temperature values of lithium-ion batteries under load through sensors and provides visualization using the Arduino microcontroller and C# programming language. The purpose of this study is to monitor the performance of lithium-ion batteries and detect potential overload or overheating situations. The data obtained through the sensors is processed on the microcontroller in the circuit and transferred to the computer environment using the C# programming language. This data is visually presented to the user through radial indicators. Additionally, regression models were used with the Python programming language to predict long charging and discharging times. In the following sections of the article, the design of the study, the hardware and software components used, and the results obtained are explained in detail. The results demonstrate the effectiveness of such an approach for real-time monitoring and ensuring the safety of lithium-ion batteries.

Keywords: Lithium-ion battery, Arduino, C#, Polynomial regression, GUI design

yönetim sistemleri, elektrikli cihaz teknolojisinin geliştirilmesi ve sürekli izlenmesi için kritik öneme sahiptir.

Bu çalışma kapsamında, pillerin anlık durumlarının izlenebilmesi için Arduino [2] mikro denetleyici ve C# programlama dili kullanılarak bir arayüz tasarlanmıştır. Benzer bir çalışmada C# ile sıcaklık, basınç, mesafe gibi temel özelliklerin verilerinin görselleştirilmesi hedeflenmektedir [3]. Bu çalışmada ise, Arduino

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: sezerulukaya@trakya.edu.tr (S. Ulukaya)
Geliş / Received: 09.04.2024 Kabul / Accepted: 20.08.2024 Yayımlanma / Published: 15.10.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1467037

mikrodenetleyiciden gelen çeşitli sensör verileri, akım, sıcaklık, güç ve voltaj olmak üzere işlenmektedir. Bu veriler, grafik ve radyal görselleştirmelerle zenginleştirilerek kullanıcı arayüzüne iletilmektedir. Kullanıcılar, bu arayüz üzerinden pillerin anlık durumlarını kolayca izleyebilir, gerektiğinde müdahale edebilirler ve Structured Query Language (SQL) veri tabanına ilgili verileri kaydedebilmektedirler. Benzer bir çalışmada C# programlama dili kullanılarak konuşma bozukluklarına dair eğitim amaçlı bir platform tasarlanmıştır [4]. Bu çalışmada ise, SQL veri tabanına kaydedilmiş olan verileri Python programlama dili kullanarak, gerilim, akım ve sıcaklığa dayalı verileri işleyerek, bağlanım (regresyon) modelleri oluşturulmuştur. Bu modeller kullanılarak, pilin deşarj ve şarj olma süreleri tahmin edilmiştir. Ayrıca, çekilen verilerle grafik çizimleri gerçekleştirilerek, elde edilen sonuçlar görsel olarak da analiz edilmiştir.

Düşük maliyetli devre tasarımı hedefi nedeniyle uzun deşarj süreleriyle başa çıkabilmek için iki farklı bağlanım modeli kullanılmıştır. Bağlanım modelleri, veri kümesi üzerinde matematiksel bir ilişki kurarak, pilin voltaj değerine göre ne kadar sürede deşarj-şarj olduğunu tahmin etmek için kullanılır. Benzer bir çalışmada RC devresi üzerinde batarya sağlık ve kapasitesi kestirimi için doğrusal bağlanım kullanılmıştır [5]. Literatürde hücrelerin sağlık durumu ve kapasitesi, enerji verimliliğini artırmak, pil ömrünü uzatmak ve elektrikli araçlarda enerji tüketimini daha iyi yönetmek amacıyla tespit edilmeye çalışılmıştır [6-8]. Bir çalışmada, 4 adet li-iyon hücrenin sağlık durumu diferansiyel termal voltmetre yöntemiyle belirlenmeye çalışılmıştır [6]. Başka bir çalışmada, elektrikli araçlar için voltaj, akım ve sıcaklık ölçümü Arduino ve multimetre sonuçları karşılaştırılarak yapılmıştır [7]. Başka bir çalışmada, pil ömrü hesaplaması için hem voltaj hem de akım ölçülebilen ve Wi-Fi üzerinden internet uygulama sunucusuna gönderebilen batarya yönetim sistemi sunulmuştur [8]. Batarya yönetim sistemleri için geliştirilmesi planlanan model, pilin davranışını daha iyi anlamaya, uzun deşarj süreleriyle ve anlık değişimlerle daha etkili bir şekilde başa çıkabilmeye olanak tanımalıdır.

Bu amaçla, çevre dostu ve sürdürülebilir sistemlere yönelik talebi karşılamak adına lityum-iyon pillerin güvenliği ve performans üzerindeki kontrolü artırarak, daha verimli ve uzun ömürlü enerji depolama çözümleri sunulması ve kullanıcı dostu arayüz ile izlenebilirliğinin artırılması hedeflenmiştir.

Bu çalışmada ele alınan lityum-iyon pil kontrol sistemi, elektrikli cihazlarda kullanılan enerji depolama sistemlerinin güvenli ve etkili bir şekilde izlenmesini sağlamayı amaçlar. Sistem, ACS712 akım sensörü ve NTC sıcaklık sensörü gibi özel bileşenlerle entegre edilmiştir. Bu bileşenler, pilin güncel akım ve sıcaklık durumlarını hassas bir şekilde ölçer ve kullanıcıya gerçek zamanlı bilgi sunar.

Devrede yer alan motor, kullanıcıya pilin mevcut yük altında olduğunu belirtir ve aşırı akım çekilmesinde pilde oluşacak sıcaklık artışlarında sıcaklık sensörü aracılığıyla yapılan ölçümler, pilin aşırı ısınma durumunda motorun çalışmasını durdurur. Sıcaklık belirlenen düzeye indiğinde gerekli önlemler alındıktan sonra devreye güç vermeye devam eder. Bu durumu sağlayan anahtarlama elemanı ise

BC337 transistördür. Devrede, mikrodenetleyici üzerinden gelen dijital pin girişleri yardımı ile yüksek (high) ve düşük (low) komutları kullanılarak pildeki sıcaklık artışında pilin ömrünün kılmasını engellemek için kullanılmaktadır. Arduino mikrodenetleyicisi, bu sensörlerden gelen verileri işleyerek motoru kontrol eder ve pilin durumu hakkında görsel geribildirim sağlar. Bir çalışmada, sıcaklığın farklı anolara sahip lityum iyon pillerin kapasitesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır [9]. Başka bir çalışmada ise transistörün anahtarlama elemanı olarak kullanıldığı Arduino kontrollü darbeleri ark kaynağı örneği incelenmiştir [10].

Son yıllarda elektrikli araç teknolojisinin gelişimi ve talebi ile batarya yönetim sistemleri ve lityum-iyon piller üzerine denetimli makine öğrenme çalışmaları da literatürde yer almaya başlamıştır [11-13]. Bir çalışmada, nesnelerin interneti çerçevesinde STM32 mikro denetleyici ile hazır bir veri kümesi üzerinde yapay sinir ağları, destek vektör makinaları ve rastgele orman yöntemleri kullanılarak batarya sağlığı tahmini üzerine performans analizi yapılmıştır [11]. Başka bir çalışmada, şarj durumu-açık devre gerilimi ilişkisi hazır bir veri tabanı üzerinde makine öğrenme algoritmaları kullanılarak irdelenmiştir [12]. Başka bir çalışmada, elektrikli bir aracın aküsünün şarj durumu tahmini için STM32 mikro denetleyici kullanarak evrişimli sinir ağı ve tekrarlayan sinir ağı karşılaştırılmıştır [13]. Hem donanım içeriğine hem de eğitim amaçlı kullanılacak arayüz tasarımına sahip düşük maliyet hedefli bu prototip çalışmasına benzer bir çalışmaya tarafımızca literatürde rastlanılmamıştır. İlgili literatür [3-13] ile karşılaştırıldığında bu çalışmanın farklı yönleri eğitim amaçlı kullanılacak arayüz geliştirilmesi, kullanılacak yük elemanlarının değiştirilebilmesi, her bir durum için farklı veri tabanı oluşturulup kaydedilebilmesi, hazır bir veri tabanına ihtiyaç duymaması, bağlanım modelleri ile kestirim yapabilmesi ve değişken sıcaklık değerlerinde analize imkân sağlaması olarak sıralanabilir.

Bu çalışmanın önemi, sadece mevcut elektrikli cihazların güvenliğini arttıracak önlemlerle sınırlı kalmayıp aynı zamanda yükün başka elektronik elemanlarla değiştirilmesi veya farklı tipte piller takılmasıyla gelecekte eğitim arayüzü olarak da kullanılacak olmasıdır. Lityum-iyon pillerin performansını artırmak ve güvenliğini sağlamak, elektrikli araçların menzilin, şarj süresini ve dayanıklılığını artırarak daha geniş bir kullanıcı kitlesine hitap edebilmesini sağlayabilir.

2 Materyal ve metod

Bu çalışmada, lityum-iyon pil kontrol sisteminin geliştirilmesi ve pil davranışının izlenmesi için belirli materyaller ve bağlanım modeli kullanılmıştır. Bu bölümde, çalışmanın tekrarlanabilirliği için kullanılan materyaller ve tercih edilen metod ayrıntılı olarak sunulmuştur.

2.1 Materyaller

Çalışmanın merkezindeki donanım olan Arduino mikrodenetleyici, ACS712 akım sensörü ve NTC sıcaklık sensöründen gelen verileri işlemek ve kontrol etmek için kullanılmıştır. Arduino, sensörlerden gelen verileri okumak, işlemek ve çeşitli çıkışları kontrol etmek için uygun bir platform sağlamıştır. Genel olarak 18650 lityum iyon pil,

3.7V nominal gerilim, 2.5V minimum gerilim, 4.2V maksimum gerilim, 2000-3500mAh kapasite, 500+ şarj döngüsü ve yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Kullanılan 18650 lityum iyon pil, 3.7V nominal gerilim ve 2000mAh kapasite özelliklerine sahiptir. Lityum iyon pilin şarj işlemi, 18650 3.7V pil şarj cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

ACS712 akım sensörü, pil akımını ölçmek için kullanılmıştır. ACS712 5A modeli, 5V çalışma gerilimi, 185 mV/A hassasiyet, $\pm 5A$ ölçüm aralığı, 5 μs tepki süresi ve analog voltaj çıkışı sunar. Analog bir sinyal üreten bu sensör, pilin anlık akım tüketimini ölçmek için devreye entegre edilmiştir. Pilin sıcaklık değerini ölçmek için NTC (Negative Temperature Coefficient) sensörü tercih edilmiştir. Bu sensör, pilin sıcaklık değişimlerini algılamak ve aşırı sıcaklık durumlarında uygun önlemleri almak için kullanılmıştır.

Arduino tarafından kontrol edilen BC337 BJT transistör, belirli eşik değerleri aşıldığında motorun kontrolünü sağlamak için kullanılmıştır. BC337 transistörünün orta bacağından çıkan dijital sinyal girişi anahtarlama olarak kullanılmış ve sıcaklık değeri ile birleştirilmiştir. Pil aşırı ısınmaya başlarsa ve sıcaklık atanan eşik değerini aşarsa, tekrar bu değerin altına düşene kadar enerji iletimi düşük (low) kademeye düşürülmektedir. Sıcaklık düştükten sonra sinyal tekrar yüksek (high) kademeye çıkarılıp enerji iletimine başlanmaktadır. Bu, pilin aşırı deşarj veya aşırı akım çekme durumlarında koruma sağlamak amacıyla tercih edilmiştir.

Pilin yük altında olduğunu görsel olarak ifade etmek ve kullanıcıya geri bildirim sağlamak amacıyla bir motor kullanılmıştır. Motor, pilin durumuyla ilgili görsel bir gösterge olarak işlev görmüştür. Devrenin elektriksel kararlılığını sağlamak ve sensörlerin doğru çalışmasını temin etmek için uygun dirençler ve kondansatörler seçilmiştir. Sensörlerden gelen verilerin işlenmesi, kontrol algoritmalarının yazılması ve görselleştirme için Arduino IDE kullanılmıştır. Bu entegre geliştirme ortamı, Arduino platformunda yazılım geliştirmeyi kolaylaştırmıştır. Veri tabanından çekilen verilerin işlenmesi ve makine öğrenmesi modellerinin oluşturulması için Python programlama dili tercih edilmiştir. Python'un geniş kütüphane desteği ve veri analitiği yetenekleri, veri işleme ve tahminleme süreçlerini kolaylaştırmıştır.

Sensörler aracılığıyla elde edilen veriler, Arduino IDE üzerinde işlenir ve C# programlama dili kullanılarak bilgisayar ortamına kaydedilir. Bu veriler, radyal göstergeler aracılığıyla kullanıcıya görsel olarak sunulur. Arayüz üzerinden toplanan veriler gerektiğinde bir SQL veri tabanına kaydedilebilmektedir. Verilerin veri tabanına aktarılmasının nedeni, lityum iyon pilin uzun deşarj ve şarj sürelerinin Python'da bağlantı modelleri kullanılarak yüksek doğruluk oranlarıyla tahmin edilmek istenmesidir.

2.2 Metodlar

2.2.1 Veri toplama ve veri işleme

ACS712 ve NTC sensörlerinden gelen veriler, Arduino mikrodenetleyicisi tarafından okunmuş, işlenmiş ve gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamalar, pilin anlık akım, güç tüketimi ve sıcaklık değerlerini belirlemek için kullanılmıştır.

2.2.2 C# Veri arayüzü tasarımı

C# ile tasarlanmış bir arayüz kullanılmıştır. Arayüz, grafiksel olarak kullanıcı dostu yönüyle, pil kontrol sisteminin izlenmesini ve yönetilmesini sağlamıştır. Arduino mikrodenetleyicisinden gelen veriler, arayüzde grafiksel olarak görselleştirilmiş ve kullanıcıya geri bildirim sağlanmıştır. Ayrıca, arayüz üzerindeki butonlar ve girdi alanları aracılığıyla kullanıcının veri girişi yapması ve belirli işlemleri gerçekleştirmesi mümkün olmuştur. Son olarak, arayüz üzerinden toplanan veriler gerektiğinde bir SQL veri tabanına kaydedilmiş ve analiz için hazır hale getirilmiştir. Bu sayede, çalışmanın tekrarlanabilirliği sağlanmıştır.

2.2.3 Görselleştirme

Arduino IDE kullanılarak elde edilen veriler, grafiksel bir arayüzde görselleştirilmiş ve kullanıcıya geri bildirim sağlanmıştır. Bu görselleştirmeler, pilin durumu hakkında hızlı ve anlaşılabilir bilgiler sunmuştur.

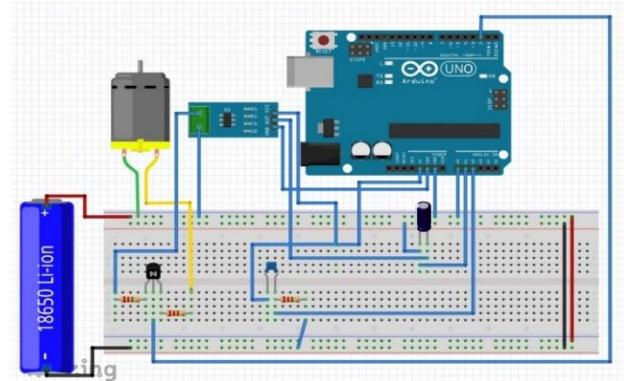
2.2.4 SQL veri tabanında işleme

Arduino IDE ile elde edilen veriler, Python programlama dili kullanılarak SQL veri tabanına kaydedilmiş ve saklanmıştır. Bu işlem, verilerin uzun vadeli saklanması ve analiz için hazır hale getirilmesini sağlamıştır.

2.2.5 Bağlanım modelleri

Python programlama dili kullanılarak SQL veri tabanından çekilen veriler üzerinde makine öğrenmesi modelleri oluşturulmuştur. Bu modeller, pilin deşarj-şarj durumunu tahmin etmek için kullanılmış ve pilin davranışının gelecekteki trendlerini belirlemeye yardımcı olmuştur. Çalışmada, doğrusal ve doğrusal olmayan bağlantı modelleri kullanılmıştır [14]. Doğrusal ve polinom bağlantı modellerinin performansları karşılaştırılmıştır. Bu modeller, 3.7V-4.2V arasında bir voltaj değeri girilince ne kadar süredir şarj olduğunu veya deşarj olduğunu saniye cinsinden kestirme amacıyla kullanıcıya yardımcı olmak için kullanılmıştır.

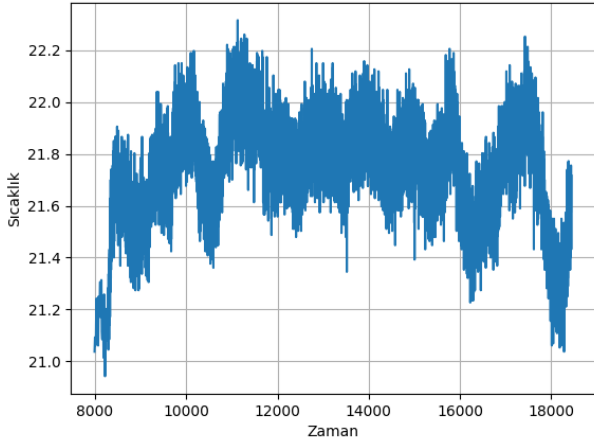
Bu şekilde, çalışmanın tekrarlanabilirliği için kullanılan materyaller ve tercih edilen metot açık bir şekilde sunulmuştur.



Şekil 1. Devrenin şematik görünümü (Fritzing kullanılarak oluşturulmuştur).

3 Bulgular ve tartışma

Veri toplama ve işleme sürecinde ACS712 akım sensörü ve NTC sıcaklık sensörü kullanılarak pilin güncel akım ve sıcaklık durumlarının belirlenmesi için Şekil 1’de gösterildiği gibi devre bağlantıları sağlanmıştır. Arduino mikrodenetleyicisi, bu sensörlerden gelen verileri işleyerek gerçek zamanlı bilgi sağlamaktadır. Elde edilen değerler, Arduino IDE kullanılarak veri tabanına iletilen verilerin Python ile grafiksel olarak ifade edilmesi ile görselleştirilmiştir. Ayrıca, pilin mevcut yük altında olduğunu belirten motor ve aşırı ısınma durumunda kullanıcıya uyarı veren sıcaklık sensörü, pil yönetim sisteminin etkinliğini artırmıştır. Geliştirilen kontrol sistemi, lityum-iyon pillerin güvenli ve verimli kullanımını desteklemek amacıyla prototip devre olarak temsil edilmiştir. Pilin gerçek zamanlı izlenebilmesi, enerji verimliliğini artırmak ve pil ömrünü uzatmak için kritik bir rol oynamaktadır.



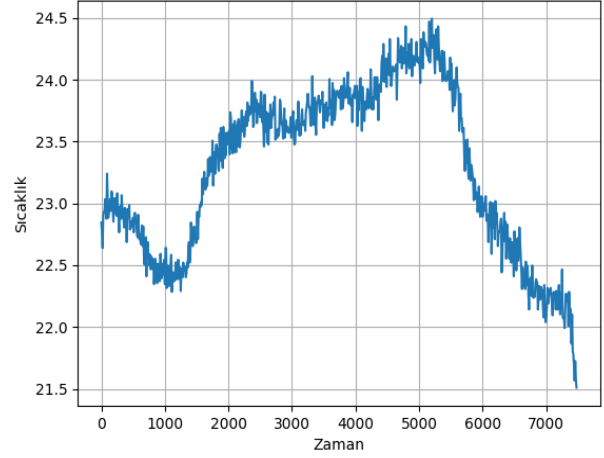
Şekil 2. Şarj işlemi sırasında pilin anlık sıcaklık değişimi grafiği

Grafiklere bakılarak, pillerin şarj ve deşarj durumlarında sıcaklık değişimleri gözlemlenebilmektedir. Deşarj ve şarj durumlarında sıcaklıkların değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Ayrıca, şarj ve deşarj durumlarında pillerin gerilimlerinin polinom bağlanım modeli ile tahmin edilen değerleri ilgili grafiklerden izlenmektedir.

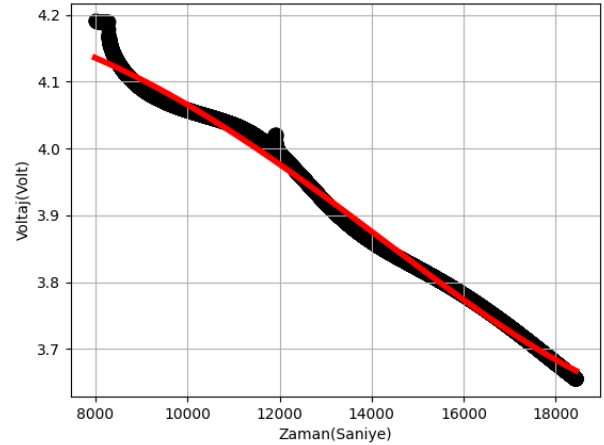
Şekil 2 ve Şekil 3’te görülen grafikte, pilin şarj ve deşarj olur iken üzerindeki motor yükü vasıtasıyla pilden çekilen akımın, pilde oluşturduğu sıcaklığın zamanla nasıl arttığı gözlemlenebilmektedir. Bu veriler veri tabanından elde edilmiş ve ardından Python koduyla bu veriler alınarak Matplotlib kütüphanesiyle görselleştirilmiştir [15]. X eksenini zamanı, Y eksenini ise sıcaklığı temsil etmektedir. Şekil 3’te yük çekilmeye başladığı anda sıcaklığın hızlı bir şekilde yükseldiği gözlemlenmiştir.

Şekil 4 ve Şekil 5’te, Arduino üzerinden çekilen verilerin C# yardımıyla SQL’e kaydedildiği ve ardından makine öğrenmesi kullanılarak oluşturulan bir polinom regresyon modeli ile zaman ve voltaja bağlı değişimlerin gözlemlendiği bir tahmin görseli bulunmaktadır. Bu model, R² skoru ile tahminlerde bulunmayı sağlamaktadır [16]. Bu sayede,

belirli bir voltajın girilmesi durumunda pilin ne kadar sürede şarj veya deşarj olacağı tahmin edilebilmektedir.



Şekil 3. Deşarj işlemi sırasında pilin anlık sıcaklık değişimi grafiği

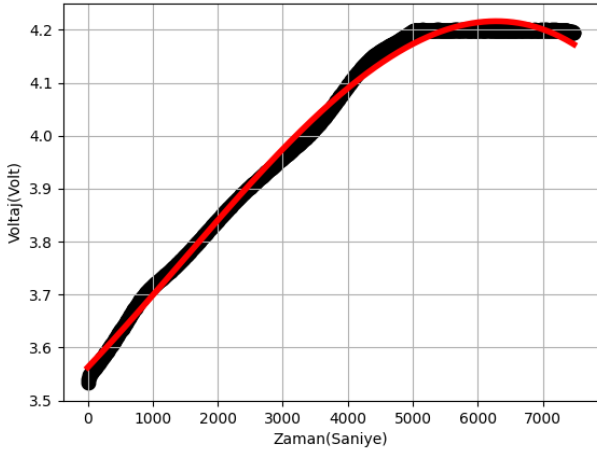


Şekil 4. Deşarj durumunda polinom bağlanım modeli tahmini (kırmızı renkli)

Bu yazılımın sunduğu avantajlardan biri de pillerin uzun sürede şarj olması nedeniyle, pilin şarj veya deşarj olma süresini tahmin edebilecek bir modele sahip olmasıdır. Yapılan deneyler sonucu doğrusal bağlanım modeli ile deşarj süresini doğru tahmin etme oranı % 99.21 iken polinom bağlanım modeli ile % 99.26 doğru tahmin etme oranına ulaşılmıştır.

C# dilinde geliştirilen arayüz, Arduino ile etkileşim kurarak çeşitli ölçümleri görsel olarak sunmaktadır. Bu arayüz, Arduino’ndan alınan sıcaklık, voltaj, akım ve güç değerlerini kullanarak bir dizi görsel öğe ile kullanıcıya sunmaktadır. Şekil 6’da tasarlanan arayüz bulunmaktadır.

Arayüzde dört adet radyal gösterge bulunmaktadır. Birinci radyal gösterge, pilin anlık gerilimini, ikincisi anlık akımını, üçüncüsü anlık gücünü ve dördüncüsü de sıcaklığı göstermektedir. Bu göstergeler, kullanıcının belirli bir anda ölçülen değerleri kolayca takip edebilmesini sağlamaktadır.

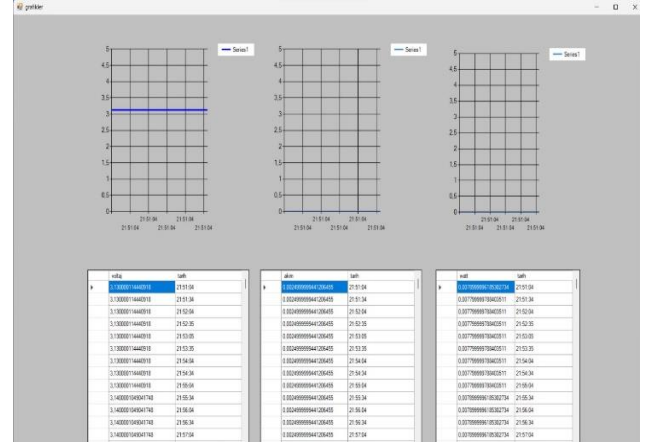


Şekil 5. Şarj durumunda polinom bağlanım modeli tahmini (kırmızı renkli)

Ayrıca, arayüzde iki farklı grafik bulunmaktadır. Birinci grafikte mavi renkle ortam sıcaklığı, sarı renkle güç değerleri gösterilmektedir. İkinci grafikte ise kırmızı renkle akım, mavi renkle voltaj değerleri görselleştirilmektedir. Bu grafikler, ölçülen değerlerin zaman içindeki değişimini takip etmek için kullanıcıya bir gösterim sunmaktadır.

Arayüz aynı zamanda kullanıcıya Arduino'nun bağlı olduğu portu seçme ve iletişim hızını belirleme imkânı da sunmaktadır. İki ayrı buton aracılığıyla bağlantıyı açıp kapatma işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. Bu özellik, kullanıcının Arduino ile iletişimi başlatıp sonlandırmasına olanak tanır.

Kayıtlı verileri görüntüle kısmına tıklanıldığında Şekil 7'de yer alan arayüz açılır, kullanıcının istediği süre boyunca veri ekleyip durdurma fonksiyonu bulunmaktadır.

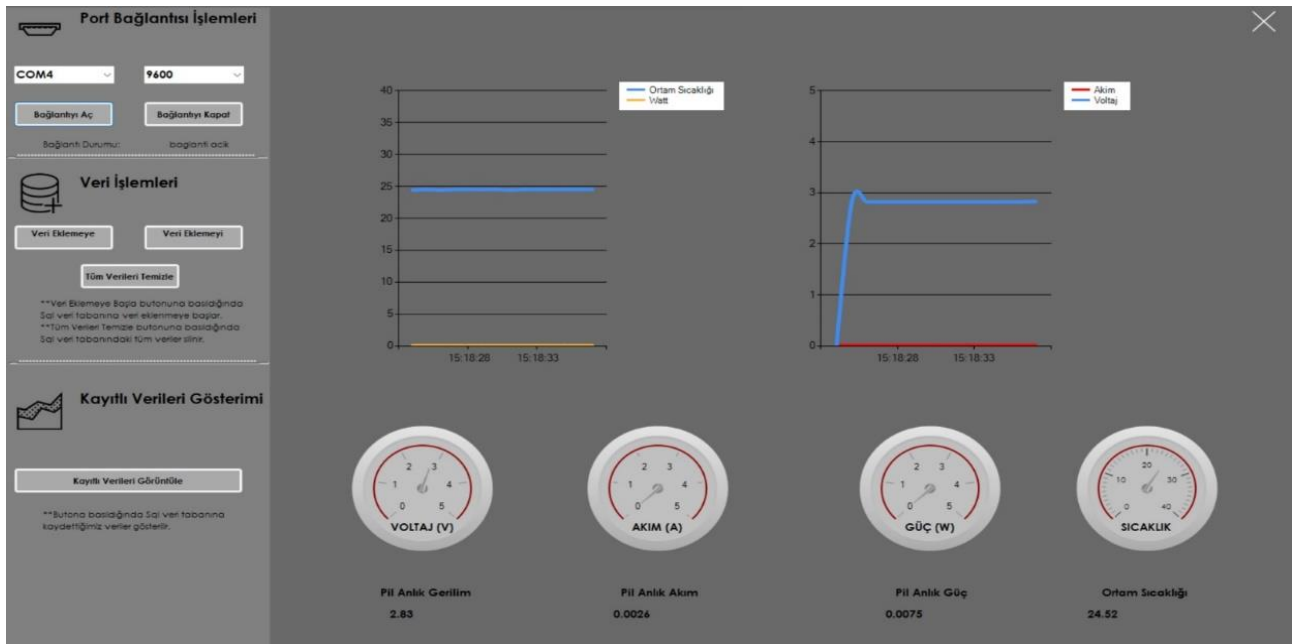


Şekil 7. Kaydedilen verilerin istenilen zaman aralığına göre görselleştirilmesine yönelik arayüz

4 Sonuçlar

Bu çalışmanın sonuçları, geliştirilen lityum-iyon pil kontrol sistemi ile ilgili önemli bulgular ortaya koymaktadır. Çalışmada kullanılan ACS712 akım sensörü ve NTC sıcaklık sensörü sayesinde pilin akım ve sıcaklık durumları hassas bir şekilde ölçülerek gerçek zamanlı olarak Şekil 6'da görüldüğü gibi izlenmiştir. Ayrıca, BC337 BJT transistörü kullanılarak belirlenen eşik değerleri aşıldığında motorun kontrolü sağlanarak kullanıcıya uyarı sunulmuştur.

Arduino mikrodenetleyicisi, sensörlerden gelen verileri işleyerek pilin durumu hakkında kullanıcıya bilgi sunarken, C# programlama dili kullanılarak geliştirilen arayüz (Şekil 6) sayesinde bu veriler görsel olarak izlenebilir hale getirilmiştir. Arduino IDE ve Python programlama dili aracılığıyla alınan veriler, SQL veri tabanına işlenmiş ve ardından bağlanım modelleri kullanılarak pilin deşarj-şarj olma durumu tahmin edilmiştir.



Şekil 6. Verileri görselleştiren ve daha sonra kullanılmak üzere kaydedebilen tasarlanan arayüz

Tablo 1’de pilin gerilim değerine bağlı ne kadar süredir (saniye) deşarj olduğu ilk 5 satırda gösterilmiştir. Son satırda ise pilin anlık gerilim değeri 3.7V iken ne kadar süredir (saniye) deşarj olduğu tahmin edilmiştir.

Tablo 1. Pilin gerilim değerine bağlı olarak deşarj süresi tahmini

No	Gerilim (V)	Zaman (s)
1	3.693510	17742.416843
2	3.693353	17743.416843
3	3.693274	17744.416843
4	3.693204	17745.416843
5	3.693133	17746.416843
Tahmin	3.7	17597.349420

Ayrıca, Python’da matplotlib kütüphanesi ile deşarj-şarj işlemlerinde kayıtlı verilerden sıcaklık değerleri, Şekil 2 ve Şekil 3’te görüldüğü gibi grafik haline getirilmiştir. Kayıtlı olan tüm veriler Şekil 7’de grafikler ile görselleştirilmiştir. Bu özellik, kullanıcının veri alımını kontrol etmesine ve istediği zaman veri akışını durdurmasına olanak tanır. Ayrıca, tüm verileri temizle butonu aracılığıyla SQL veri tabanındaki tüm verilerin temizlenmesi sağlanmaktadır. Bu özellik de kullanıcının veri tabanındaki verileri gerektiğinde temizleme ve yeni deney/süreç başlatma imkânı için hafızada yer açılmasına olanak sağlar.

Elde edilen sonuçlar, geliştirilen kontrol sisteminin lityum-iyon pillerin güvenli ve verimli kullanımını desteklemede etkili olduğunu göstermektedir. Sistemin gerçek zamanlı izleme, kullanıcı uyarıları ve güç tahmin modelleri sayesinde pil yönetimi daha etkin hale getirilmiştir. Son yıllarda ön plana çıkmaya başlayan elektrikli araç endüstrisi başta olmak üzere enerji depolama sistemleri için çözümler kritik bir öneme sahiptir.

Çalışmanın çok yönlü tasarımı, lityum-iyon pil kontrol sistemini sadece elektrikli araçlar için değil, aynı zamanda taşınabilir elektronik cihazlar, enerji depolama sistemleri ve yenilenebilir enerji çözümleri gibi farklı sektörlerde de kullanılabilir hale getirmeyi amaçlamıştır. Bu özellik, çalışmanın sadece mevcut teknolojiyi iyileştirmekle kalmayıp aynı zamanda gelecekteki enerji teknolojilerine de katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, geliştirilen lityum-iyon pil kontrol sistemi, çevre dostu ve sürdürülebilir ulaşım sistemlerine yönelik talebi karşılamak adına önemli bir prototipi temsil etmektedir. Gelecekte, lityum-iyon pillerin güvenli ve etkili bir şekilde kullanılmasına katkı sağlamakla kalmayıp aynı zamanda bu alandaki araştırmalarda yük elemanının değiştirildiği senaryolara göre eğitim amaçlı bir arayüz olarak da kullanılabilmesi öngörülmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %8

Kaynaklar

- [1] B. D. Polat ve Ö. Keleş, Lityum iyon pil teknolojisi. Metalurji Dergisi, 162, 42-48, 2012. https://metalurji.org.tr/dergi/dergi162/d162_4248.pdf.
- [2] S. A. Arduino, Arduino. Arduino LLC, 372. <https://search.iczhiku.com/paper/TFzDJhGhd6VMaDsI.pdf>, Accessed 08 April 2024.
- [3] V. Çavuş, T. Resul, İ. U. Duran, Arduino devreleri için kod üretme ve veri işleme uygulaması tasarımı, Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 5(1), 387-390, 2017. <https://doi.org/10.18586/msufbd.322388>.
- [4] A. K. Ayça, A. Sarıkas, A. Yayla, Konuşma sesi bozukluklarının düzeltilmesine yönelik eğitim platformu tasarımı, Bilişim Teknolojileri Dergisi, 10(3), 241-246, 2017. <https://doi.org/10.17671/gazibtd.330867>.
- [5] T. Kim, Y. Wang, H. Fang, Z. Şahinoğlu, T. Wada, S. Hara, and W. Qiao, Model-based condition monitoring for lithium-ion batteries. Journal of Power Sources, 295, 16-27, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.03.184>.
- [6] Y. Merla, B. Wu, V. Yufit, N. P. Brandon, R. F. Martinez-Botas, and G. J. Offer, Extending battery life: A low-cost practical diagnostic technique for lithium-ion batteries. Journal of Power Sources, 331, 224-231, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.09.008>.
- [7] Y. Calvinus, F. Wiryanata, and H. Tanujaya, Battery charging management system design with voltage, current and temperature monitoring features in electric vehicles. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1007, 1, 012174, 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1007/1/012174>.
- [8] D. Rimpas, V. A. Orfanos, P. Chalkiadakis, and I. Christakis, Design and development of a low-cost and compact real-time monitoring tool for battery life calculation. Engineering Proceedings, 58(1), 17, 2023. <https://doi.org/10.3390/ecsa-10-16146>.
- [9] S. Lv, X. Wang, W. Lu, J. Zhang, and H. Ni, The influence of temperature on the capacity of lithium ion batteries with different anodes. Energies, 15(1), 60, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15010060>.
- [10] N. Y. Krampit, T. S. Kust, and M. A. Krampit, Specifics of pulsed arc welding power supply performance based on a transistor switch. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 142, 1, 012013, 2016. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/142/1/012013>.
- [11] G. Crocioni, D. Pau, J. M. Delorme, and G. Grusso, Li-ion batteries parameter estimation with tiny neural networks embedded on intelligent IoT microcontrollers. IEEE Access, 8, 122135-122146, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007046>.
- [12] S. S. S. Narayanan and S. Thangavel, Machine learning-based model development for battery state of charge–open circuit voltage relationship using regression techniques. Journal of Energy Storage, 49,

- 104098, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104098>.
- [13] Y. Mazzi, H. Ben Sassi, A. Gaga, and F. Errahimi, State of charge estimation of an electric vehicle's battery using tiny neural network embedded on small microcontroller units. *International Journal of Energy Research*, 46(6), 8102-8119, 2022.
<https://doi.org/10.1002/er.7713>.
- [14] E. Ostertagová, Modelling using polynomial regression. *Procedia Engineering*, 48, 500-506, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.545>.
- [15] J. D. Hunter, Matplotlib: A 2D Graphics Environment. *Computing in Science & Engineering*, 9, 3, 90-95, 2007. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>.
- [16] D. Gómez, P. Salvador, J. Sanz, and J. L. Casanova, Potato yield prediction using machine learning techniques and sentinel 2 data. *Remote Sensing*, 11(15), 1745, 2019.
<https://doi.org/10.3390/rs11151745>.





MIMO-FBMC/OQAM sisteminde ayırık guguk kuşu arama algoritması kullanılarak sembol vektörlerinin algılanması

Detection of symbol vectors using discrete cuckoo search algorithm in MIMO-FBMC/OQAM system

Sakir Şimşir^{1,*} 

¹ Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 50300, Nevşehir Türkiye

Öz

Çoklu-giriş çoklu-çıkış (MIMO) teknolojisinin filtre bankası çoklu taşıyıcı/ofset dördün genlik modülasyonuna (FBMC/OQAM) uygulanması sonucu elde edilen MIMO-FBMC/OQAM sistemi, kablosuz haberleşmede karşılaşılan birçok soruna çare olabilecek önemli özellikleri bünyesinde barındırmaktadır. Öte yandan, MIMO-FBMC/OQAM sisteminde sembol vektörlerini alıcıda en doğru şekilde algılayabilen etkili bir sembol dedektörüne ihtiyaç duyulmaktadır. Geleneksel maksimum olasılık (ML) dedektörü, kusursuz bir sembol algılama performansına sahiptir. Ancak alıcıya ulaşan sinyal üzerinden hangi sembol vektörünün iletilmiş olduğuna karar verirken, oluşabilecek bütün sembol kombinasyonlarını denemesi, ML dedektörünün karmaşıklığını oldukça yüksek seviyelere çıkarmaktadır. İdeal bir sembol dedektöründen, sembol vektörlerini minimum hata ile tespit etmesi ve bu işi sistem karmaşıklığını çok fazla artırmadan gerçekleştirmesi beklenir. Bu çalışmada, söz konusu beklentiye uygun bir sembol dedektörü geliştirmek için klasik ML dedektörü modifiye edilmiştir. Araştırma uzayında yer alan olası bütün sembol kombinasyonlarını tek tek deneyerek doğru sonuca ulaşmak yerine, sembol vektörleri optimize edilerek, optimum çözüme en kısa yoldan ulaşma yoluna gidilmiştir. Bu amaçla, birçok alanda yaygın olarak kullanılan guguk kuşu arama (CS) algoritmasının etkili bir ayırık versiyonu (DCS) kullanılmıştır. Söz konusu modifikasyon sonucu elde edilen DCS-ML stratejisi ile optimum çözüme oldukça yakın sonuçlar elde edilmekle kalmayıp, klasik ML dedektörünün karmaşıklığı büyük oranda düşürülmüştür.

Anahtar kelimeler: MIMO, Sembol algılama, FBMC/OQAM, Maksimum olasılık, Guguk kuşu arama algoritması

1 Giriş

Dikgen frekans bölmeli çoğullama (OFDM) [1, 2], uzun vadeli evrim (LTE)/4G mobil sistemlerde yıllarca temel dalga formu olarak kullanıldıktan sonra, sade yapısı ve çok yönlü kanalların negatif etkilerine karşı dayanıklılığı sebebiyle, 5G sistemlere de adapte edilmiştir. Ancak döngüsel önek kullanımı ve bant dışı radyasyona sebebiyet veren dikdörtgen darbe yapısı, OFDM'nin spektral

Abstract

MIMO-FBMC/OQAM system, which is obtained by applying the multiple-input multiple output (MIMO) technology to the filter bank multicarrier/offset quadrature amplitude modulation (FBMC/OQAM) incorporates important features that can solve many problems encountered in wireless communication. On the other hand, an efficient symbol detector that can detect the symbol vectors at the receiver in the most accurate way is required in the MIMO-FBMC/OQAM system. The conventional maximum likelihood detector has a flawless symbol detection performance. However, when deciding which symbol vector has been transmitted based on the signal reaching the receiver, trying all of the possible symbol combinations enhances the complexity of ML to very high levels. It is expected from an ideal symbol detector to detect the symbol vectors with minimum error and do this task without increasing the system complexity too much. In this study, the classical ML detector was modified to develop a symbol detector compatible with the aforementioned expectation. Instead of reaching the correct result by trying all of the possible symbol combinations existing in the search space one by one, it was tried to reach the optimum solution in the shortest way by optimizing the symbol vectors. To this end, an efficient discrete version (DCS) of the cuckoo search (CS) algorithm, which is commonly used in many fields, was employed. With the DCS-ML strategy obtained as a result of the aforementioned modification, not only the results that are very close to the optimal solution were achieved, but also the complexity of the classical ML detector was substantially reduced.

Keywords: MIMO, Symbol detection, FBMC/OQAM, Maximum likelihood, Cuckoo search algorithm

verimliliğini oldukça düşürmektedir. Bunun haricinde, dikliğin korunabilmesi için farklı kullanıcılar arasındaki senkronizasyonun alıcıda iyi bir şekilde ayarlanması gerekmektedir. Zamanla-değişen kanalların sebep olduğu taşıyıcı frekans kaymalarına (CFO) karşı yüksek hassasiyet, OFDM dalga formunun bir diğer önemli eksikliği olarak göze çarpmaktadır [1, 2]. Gelecek nesil mobil iletişim teknolojilerinin veri hızı, gecikme, senkronizasyon ve

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: sakirsimsir@nevsehir.edu.tr (Ş. Şimşir)
Geliş / Received: 14.05.2024 Kabul / Accepted: 20.08.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1484055

güvenlik bakımından çok daha iyi olması beklendiği için, yukarıda bahsedilen dezavantajlarından dolayı OFDM'nin yerini daha gelişmiş bir dalga formuna bırakması kaçınılmaz hale gelecektir. Araştırmacılar uzun süredir bu kaçınılmaz değişime hazırlıklı olmak için çalışmalarını sürdürmekte olup, bu süreçte çeşitli dalga formu adayları geliştirmişlerdir [3]. Filtre bankası çoklu taşıyıcı/ofset dördün genlik modülasyonu (FBMC/OQAM) [4, 5], kablosuz haberleşme teknolojisinin hızla artan ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla geliştirilmiş olan dalga formu adaylarının en önemli temsilcilerinden bir tanesidir. Bu yeni dalga formunda, OFDM'nin sahip olduğu zayıflıklar büyük oranda giderilmiştir. Örneğin FBMC/OQAM sisteminde kullanılan dikdörtgen olmayan darbe şekli, bant dışı radyasyonun büyük ölçüde azaltılmasına olanak sağlamaktadır. Bunun haricinde, geleneksel OFDM sisteminde kaçınılmaz bir işlem olan ve spektral verimsizliğe yol açan döngüsel önek ekleme işlemine, FBMC/OQAM sisteminde ihtiyaç duyulmamaktadır. Ayrıca, FBMC/OQAM sisteminde gerçekleştirilen filtreleme işlemi ile alt taşıyıcıların izole edilmesi, OFDM sisteminin en temel zayıflıkları arasında yer alan senkronizasyon hatalarına karşı direnç sağlamaktadır [4, 5]. Tüm bu avantajların yanı sıra, çoklu-giriş çoklu-çıkış (MIMO) teknolojisinden yararlanarak FBMC/OQAM sisteminin mevcut potansiyelini daha da yukarıya çekmek mümkündür [6, 7]. Çoklu anten yapısı kullanılarak gerçekleştirilen veri iletişimi, çok yollu kanalın sönmüleme etkilerine karşı sistem dayanıklılığını artırmakla kalmayıp, önemli bir kapasite artışı sağlanmasına yol açmaktadır. Kablosuz kanalın sönmüleme etkilerinin azaltılması sayesinde sistemin bit hata oranı (BER) azalırken, söz konusu kapasite artışı nedeniyle de daha yüksek veri oranlarında iletişim gerçekleştirilebilmektedir [6, 7].

Öte yandan, MIMO-FBMC/OQAM sisteminin alıcı kısmında iletilen sembollerin minimum hata ile yeniden elde edilebilmesi için etkili bir sembol dedektörüne ihtiyaç duyulmaktadır. Söz konusu sistem için hayati öneme sahip olan sembol algılama işlemi doğru bir şekilde yerine getirilmediği takdirde, yukarıda bahsedilen üstün özelliklerin hiçbir anlamı kalmayacaktır. Sıfır zorlama (ZF) ve maksimum olasılık (ML) algoritmaları, bu amaç için geliştirilmiş olan ve literatürde oldukça yaygın bir şekilde kullanılan en popüler iki sembol algılama stratejisidir [8, 9]. Bir sembol dedektöründen beklenen, sistem karmaşıklığını çok fazla artırmadan tatmin edici bir sembol algılama performansı sergilemesidir. Daha açık bir ifadeyle, ideal bir sembol dedektörü için yüksek performans ya da düşük karmaşıklık tek başına yeterli değildir. Hem performans hem de karmaşıklık kriterlerinin aynı anda karşılanması gerekir. Ne ZF ne de ML algoritması bu iki kriteri aynı anda sağlamaktadır. Söz konusu algoritmalar, bazı avantajlarının yanı sıra çeşitli dezavantajlara da sahiptirler. Örneğin, düşük karmaşıklığa sahip olması ve kolay uygulanabilir yapısı ZF sembol dedektörünün olumlu yönleri olarak öne çıkarken, nispeten zorlu kanal koşullarında göstermiş olduğu zayıf performans önemli bir dezavantaj olarak göze çarpmaktadır. Bunun haricinde, ZF dedektörünün sembol algılama performansı, anten sayısındaki artışla birlikte daha da

kötüleşmektedir [8]. ML ise, optimum sembol vektörlerine ulaşma yeteneğine sahip yegâne sembol dedektörü olarak bilinmektedir. Diğer bir ifade ile ML, en iyi çözüme ulaşmayı garanti eden bir yöntemdir. Bu nedenle, ilgili yöntemin sembol algılama performansı, literatürde geliştirilen sembol dedektörleri için üst sınır olarak kabul edilmektedir. Ancak, ML dedektörünün bu kusursuz sembol algılama performansı, son derece yüksek bir araştırma maliyetini de beraberinde getirmektedir. ML dedektörünün herhangi bir iletişim teknolojisinde pratik olarak kullanılmayacak kadar yüksek bir karmaşıklığa sahip olmasının temel nedeni, sembol algılama esnasında kullanılmış olduğu kapsamlı arama prosedürüdür. Söz konusu arama prosedürüne göre, sönmümlü kanal tarafından belirli ölçüde bozulmaya uğrayarak alıcıya ulaşan sembol vektörü, alıcıya iletilme olasılığı olan sembol kombinasyonlarından her biri ile Öklid mesafesi bakımından karşılaştırılmaktadır. Sembol vektörü uzunluğunun anten sayısına eşit olduğu ve anten sayısı ile modülasyon seviyesi arttıkça olası sembol kombinasyonu sayısının da artacağı unutulmamalıdır. Olası sembol kombinasyonlarından her birinin alınan sembol vektörüne olan Öklid mesafesi hesaplandıktan sonra, minimum Öklid mesafesinin elde edildiği sembol kombinasyonu, maksimum iletilme olasılığı olan optimum sembol vektörü olarak seçilir. Olası sembol kombinasyonlarından her biri için gerçekleştirilen Öklid hesabı, ML yönteminin karmaşıklığının oldukça yüksek seviyelere çıkmasına sebep olmaktadır. Ayrıca, anten sayısı ve modülasyon seviyesindeki artışla birlikte araştırma uzayında üstel bir genişleme meydana geleceği için, ML algoritmasının karmaşıklığı çok daha yüksek seviyelere ulaşacaktır [9].

Diğer taraftan, kapsamlı arama prosedürü yerine, bir optimizasyon algoritması ile sembol vektörleri optimize edilerek, ayrık uzaydaki optimum çözüm arayışı daha sistematik bir şekilde yerine getirilecek olursa, ML dedektörü çok daha düşük işlem yükü ile optimum çözüme yakınsama kabiliyeti kazanacaktır. Burada asıl farkı yaratacak olan şey, sembol vektörlerinin optimizasyonu için geleneksel ML yöntemine entegre edilecek olan optimizasyon algoritmasının yakınsama performansidir. Birçok alanda yaygın olarak kullanılan popülasyon tabanlı meta-sezgisel algoritmalar, başlangıç koşulundan bağımsız olarak optimum çözüme en etkili şekilde ulaşmalarını sağlayan paralel araştırma yeteneklerinden dolayı, söz konusu optimizasyon işlemini yerine getirmek için en doğru tercih olacaktır. Bu çalışmada, sembol vektörlerinin optimizasyonu direkt olarak ayrık uzayda gerçekleştirilmektedir. Bu amaçla, her bir sembol vektörü, QAM sembol dizisinden ikili bit dizisi haline dönüştürülerek ayrık optimizasyon işlemi için uyumlu hale getirilir. Diğer bir ifadeyle, karmaşık bir sayı ile temsil edilen her bir QAM sembolü, kendisinin eşdeğeri olan ikili sayıya dönüştürülür. Bu şekilde QAM sembol vektörlerinin her biri, karmaşık sayı dizisi halinden ikili bit dizisi haline dönüştürülüp ayrık uzayda optimize edilmeye hazır hale getirilir. Elde edilen ikili formdaki sembol vektörlerini, meta-sezgisel algoritmaların ayrık versiyonlarını kullanarak optimize etmek mümkündür. Bu çalışmada, guguk kuşu arama

algoritmasının yakın zamanda geliştirilmiş olan etkili bir ayrık versiyonu (DCS) [10], ikili araştırma uzayında sembol optimizasyonu gerçekleştirmek üzere klasik ML dedektörüne entegre edilmiştir. İlgili entegrasyon işleminin ardından, DCS-ML olarak isimlendirilen gelişmiş bir ML varyantı elde edilmiştir. MIMO-FBMC/OQAM sisteminde, yeni geliştirilen DCS-ML stratejisinin kullanılması durumunda sembol vektörlerinin ne kadar doğru bir şekilde algılanabileceği hakkında fikir sahibi olabilmek amacıyla, farklı anten konfigürasyonları için BER analizi gerçekleştirilmiştir. İlgili performans analizinde, ZF ve ML gibi literatürde oldukça yaygın bir şekilde kullanılan klasik sembol algılama metodlarının yanı sıra, ayrık ikili harmoni arama (DBHS) algoritması [11] vasıtasıyla sembol optimizasyonu gerçekleştirilen DBHS-ML isimli meta-sezgisel tabanlı bir ML varyantı karşılaştırma amaçlı kullanılmıştır.

Literatürde çeşitli iletim teknolojilerinde meta-sezgisel algoritmalarla yararlanarak sembol algılama işleminin gerçekleştirildiği bazı çalışmalara rastlamak mümkündür. [12]'de, geri-izleme arama algoritması (BSA) tabanlı ML dedektörü geliştirilerek MIMO-NOMA (NOMA: dikgen olmayan çoklu erişim) sistemine uygulanmıştır. Daha sonra, önerilen dedektörün sembol algılama performansı BER grafikleri vasıtasıyla analiz edilmiştir. [13]'te, ağırlık vektörlerinin parçacık sürü optimizasyon (PSO) algoritması ile optimize edildiği minimum bit hata oranı (MBER) dedektörü, Bell Laboratuvarları katmanlı uzay zaman (BLAST) ile birleştirilerek MBER-BLAST isimli yeni bir sembol algılama algoritması OFDM-SDMA (SDMA: uzay bölme çoklu erişim) sistemi için geliştirilmiştir. [14]'te, PSO algoritmasının hem sürekli hem de ikili versiyonları ile desteklenmiş birkaç adet sembol algılama algoritması MIMO haberleşme sistemleri için önerilmiştir. [15]'te, geniş-MIMO sistemler için düşük-karmaşıklık bir sembol dedektörü geliştirmek amacıyla PSO ve karınca koloni optimizasyon (ACO) algoritmaları melezlenerek yeni bir hibrit algoritma elde edilmiştir. İlgili algoritmada, PSO'dan hız ölçütü, ACO'dan ise mesafe ölçütü konsepti kullanılarak yeni bir olasılık ölçütü dizayn edilmiştir. [16]'da, masif MIMO sistemlerin alıcı kısmında sembol vektörlerini optimize etmek için yapay arı kolonisi (ABC) algoritmasından faydalanılmıştır. Söz konusu çalışmada yazarlar, ABC algoritmasının başlangıç çözüm vektörleri olarak lineer algılama sonuçlarını kullanmışlardır. [17]'de, MIMO-OFDM sisteminde sembol vektörlerinin algılanması için diferansiyel gelişim (DE) algoritmasına dayanan modern bir ML dedektörü geliştirilmiştir. [18]'de, darbe genlik modülasyonu (PAM) sisteminde işlem yükü bakımından verimli bir sembol algılama işlemi gerçekleştirebilmek için, ML dedektöründe kapsamlı arama stratejisi yerine genetik algoritma (GA) tabanlı sembol optimizasyon prosedürü kullanılmıştır.

Makalenin literatüre sağladığı önemli katkılar aşağıda listelenmiştir:

1. Ayrık guguk kuşu arama (DCS) [10] algoritması, literatürde ilk defa sembol algılama problemine adapte edilmiştir.

2. DCS algoritması geleneksel ML yöntemine entegre edilerek, MIMO-FBMC/OQAM sistemi için DCS-ML isimli yeni bir sembol algılama stratejisi geliştirilmiştir.
3. Kapsamlı arama prosedürü yerine DCS tabanlı sembol optimizasyon stratejisi kullanılarak klasik ML yönteminin karmaşıklığı büyük oranda düşürülmüştür.
4. Önerilen DCS-ML stratejisi hem klasik ZF dedektörünü hem de DBHS-ML isimli gelişmiş ML stratejisini BER performansı bakımından geride bırakmıştır.

2 MIMO-FBMC/OQAM sistem açıklaması

FBMC/OQAM sistemi, en sade formunda bile geleneksel OFDM sisteminde yaşanan birçok probleme etkili çözümler sunabilme kapasitesine sahiptir. Bununla birlikte, MIMO teknolojilerinden yararlanarak FBMC/OQAM sisteminin daha yüksek veri hızlarında iletişim kurabilmesi ve çok yönlü sönümlenme etkilerine karşı daha dayanıklı hale gelmesi sağlanabilmektedir. Bu bölümde, MIMO-FBMC/OQAM sisteminde çoklu anten yapısı üzerinden veri iletişiminin nasıl gerçekleştirildiği basit ve anlaşılır bir şekilde açıklanmıştır [6].

Gerçek değerli $a_{m,n}$ sembolünün FBMC/OQAM sisteminde tek bir anten üzerinden iletilmesi durumunda, alıcıda elde edilen sinyal aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$y_{m,n} \approx h_{m,n} \cdot (a_{m,n} + j \cdot u_{m,n}) + n_{m,n} \quad (1)$$

Burada $h_{m,n}$ kanal katsayılarını, $u_{m,n}$ içsel girişimi, $n_{m,n}$ ise gürültü bileşenini temsil ederken, m ve n alt simgeleri sırasıyla alt taşıyıcı ve zaman indislerini ifade etmektedir. FBMC/OQAM sisteminde N_t adet verici N_r adet alıcı anten içeren çoklu anten yapısı üzerinden sinyal iletimi gerçekleştirildiği takdirde, Denklem (1)'de tek antenli iletim için verilmiş olan sinyal ifadesi aşağıdaki forma dönüşmektedir:

$$y_{m,n}^{(j)} = \sum_{i=1}^{N_t} h_{m,n}^{(ji)} \cdot (a_{m,n}^{(i)} + j \cdot u_{m,n}^{(i)}) + n_{m,n}^{(j)} \quad (2)$$

Burada i ve j sırasıyla verici ve alıcı anten indisleridir. Örneğin $h_{m,n}^{(ji)}$ i 'inci verici anten ile j 'inci alıcı anten arasındaki kanal katsayısına karşılık gelirken, $y_{m,n}^{(j)}$ j 'inci alıcı antende elde edilen sinyali ifade etmektedir. Denklem (2)'yi aşağıdaki gibi matris formunda da ifade etmek mümkündür:

$$\begin{bmatrix} y_{m,n}^{(1)} \\ \vdots \\ y_{m,n}^{(N_r)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{m,n}^{(11)} & \dots & h_{m,n}^{(1N_t)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m,n}^{(N_r 1)} & \dots & h_{m,n}^{(N_r N_t)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{m,n}^{(1)} + j \cdot u_{m,n}^{(1)} \\ \vdots \\ a_{m,n}^{(N_t)} + j \cdot u_{m,n}^{(N_t)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{m,n}^{(1)} \\ \vdots \\ n_{m,n}^{(N_r)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{y}_{m,n} = \mathbf{H}_{m,n} \cdot (\mathbf{a}_{m,n} + j \cdot \mathbf{u}_{m,n}) + \mathbf{n}_{m,n} \quad (4)$$

Burada alınan sinyaller ve gürültü bileşenleri $N_r \times 1$ boyutlu matrislerle ifade edilirken, iletilen semboller ve kanal katsayıları sırasıyla $N_t \times 1$ ve $N_r \times N_t$ boyutlu matrisler tarafından temsil edilmektedir.

3 Problem tanımı

3.1 FBMC/OQAM sisteminin matris tabanlı temsili

Problemi daha sade hale getirmek için FBMC/OQAM sisteminin matris gösteriminden faydalanılabilir [7]. Söz konusu matris-tabanlı sistem tanımlanmasında, prototip filtre aşağıdaki gibi bir $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{D \times MN}$ iletim matrisi tarafından temsil edilmektedir:

$$\mathbf{G} = [\mathbf{g}_{1,1} \ \mathbf{g}_{2,1} \ \dots \ \mathbf{g}_{M,1} \ \mathbf{g}_{1,2} \ \dots \ \mathbf{g}_{M,N}] \quad (5)$$

Burada $\mathbf{g}_{m,n} \in \mathbb{C}^{D \times 1}$, her biri D adet zaman örneği içeren iletim vektörlerine karşılık gelirken, M ve N sırasıyla toplam alt taşıyıcı ve toplam sembol sayılarını ifade etmektedir. Bunun haricinde, iletilen gerçek değerli semboller aşağıdaki formda tanımlanabilmektedir:

$$\mathbf{a} = \text{vec} \left\{ \begin{bmatrix} a_{1,1} & \dots & a_{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{M,1} & \dots & a_{M,N} \end{bmatrix} \right\} \quad (6)$$

$$= [a_{1,1} \ a_{2,1} \ \dots \ a_{M,1} \ a_{1,2} \ \dots \ a_{M,N}]^T$$

Denklem (5)'te verilen $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{D \times MN}$ iletim matrisi ile Denklem (6)'da ifade edilen $\mathbf{a} \in \mathbb{C}^{MN \times 1}$ sembol vektörü çarpılarak $\mathbf{s} \in \mathbb{C}^{D \times 1}$ iletim sinyali aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\mathbf{s} = \mathbf{G}\mathbf{a} \quad (7)$$

Çok yollu kanalın $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{D \times D}$ ile sembolize edilen bir konvolüsyon matrisi olarak modellenmesi durumunda, alıcıya ulaşan sinyal $\mathbf{r} \in \mathbb{C}^{D \times 1}$ aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n} = \mathbf{H}\mathbf{G}\mathbf{a} + \mathbf{n} \quad (8)$$

Yukarıdaki ifadede $\mathbf{n} \sim CN(0, P_n \mathbf{I}_D)$, beyaz Gauss gürültüsünü temsil etmektedir. Burada P_n gürültü gücünü belirtirken \mathbf{I}_D ise $D \times D$ birim matrise karşılık gelmektedir. Son olarak alınan semboller, alıcıya gelen sinyalin \mathbf{G}^H ile çarpılması sonucu aşağıdaki gibi formüle edilir.

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}^H \mathbf{r} = \mathbf{G}^H \mathbf{H}\mathbf{G}\mathbf{a} + \mathbf{G}^H \mathbf{n} \quad (9)$$

3.2 Blok frekans yayımlı FBMC/OQAM sistemi

Geleneksel OFDM sistemine rahatlıkla uygulanabilen MIMO yöntemleri, aynı zamanda içsel girişime yol açan

diklik kısıtlaması nedeniyle FBMC/OQAM sistemine doğrudan uygulanamamaktadır. Öte yandan Nissel ve arkadaşları, [7] nolu çalışmada blok frekans yayılımı olarak adlandırılan yeni bir yaklaşım geliştirerek FBMC/OQAM sistemi için karmaşık dikliği yeniden sağlamanın yolunu bulmuşlardır. İlgili yaklaşım sayesinde, MIMO yöntemlerinin FBMC/OQAM sistemine direk olarak uygulanmasının önüne geçen diklik kısıtlamasının ortadan kaldırılması mümkün hale gelmiştir. Bu çalışmada, MIMO sinyal algılama yöntemlerini diklik kısıtlaması engeline takılmadan doğrudan bir şekilde MIMO-FBMC/OQAM sistemine uygulayabilmek için, FBMC/OQAM sistemi blok frekans yayılım stratejisi ile birleştirilmiştir [7].

Blok frekans yayılım stratejisine göre, ilk olarak bilgi bitleri modüle edilerek $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{\frac{MN}{2} \times 1}$ şeklinde belirtilen QAM sembol dizisi elde edilir. Daha sonra, elde edilen sembol dizisi, $\mathbf{C} \in \mathbb{C}^{\frac{MN}{2} \times \frac{MN}{2}}$ ön kodlama matrisi vasıtasıyla yayma işlemine tabi tutulur. Böylelikle, $\mathbf{a} \in \mathbb{C}^{MN \times 1}$ şeklinde bir vektör ile temsil edilen gerçek değerli sembol dizisi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\mathbf{a} = \mathbf{C}\mathbf{x} \quad (10)$$

Alıcı kısımda, alınan semboller aşağıdaki gibi \mathbf{C}^H matrisi ile çarpılarak yayma işleminin tam tersi yerine getirilir:

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}^H \mathbf{y} \quad (11)$$

Yukarıdaki denklemin genişletilmiş formu aşağıda verilmiştir:

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}^H \mathbf{G}^H \mathbf{H}\mathbf{G}\mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{C}^H \mathbf{G}^H \mathbf{n} \quad (12)$$

3.3 MIMO-FBMC/OQAM sisteminde sembol algılama işleminin formüle edilmesi

Blok frekans yayımlı FBMC/OQAM sisteminde, QAM modüleli veri sembolleri, $\frac{MN}{2}$ adet bileşene sahip bir

$\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{\frac{MN}{2} \times 1}$ matrisi ile tanımlanmaktadır. N_t adet verici, N_r adet alıcı anten kullanılarak çoklu anten üzerinden iletim gerçekleştirildiği takdirde, $x_{m,n}$ ile sembolize edilen her bir bileşen, $x_{m,n} = [x_{m,n}^{(1)}, x_{m,n}^{(2)}, \dots, x_{m,n}^{(N_r)}]^T$ şeklinde $N_t \times 1$ 'lik bir sembol vektörüne dönüşmektedir. Burada m ve n , sırasıyla alt taşıyıcı ve sembol indisleridir. Benzer şekilde, $x_{m,n}$ sembol vektörünün alıcı kısımda elde edilmiş versiyonu

$$y_{m,n} = [y_{m,n}^{(1)}, y_{m,n}^{(2)}, \dots, y_{m,n}^{(N_r)}]^T \quad \text{şeklinde ifade}$$

edilmektedir. Söz konusu vektörlerden de anlaşılacağı üzere, iletilen sembol sayısı verici anteni sayısına eşit olurken, alınan sembol sayısı ise alıcı anteni sayısına eşit olmaktadır. ML tabanlı sembol algılama işleminde, alınan sinyalden yararlanarak en yüksek iletilme olasılığına sahip olan sembol

vektörü belirlenmektedir. QAM modülasyon seviyesi Z ile sembolize edilecek olursa, $x_{m,n}$ sembol vektörü içerisindeki her bir QAM sembolü Z farklı değer (Örneğin; 4-QAM için 4 farklı değer) alabilecektir. Buna göre, ML algoritması Z^{N_t} adet alternatif sembol vektörü arasından en yüksek iletilme olasılığına sahip optimum sembol vektörünü bulmak zorunda kalacaktır. Bu amaçla, iletilme olasılığı bulunan her bir alternatif sembol vektörü, ML algoritması tarafından aşağıdaki denklem vasıtasıyla test edilmektedir:

$$x_{m,n}^* = \arg \min_{x_{m,n}} \left\{ \|y_{m,n} - H_{m,n} \cdot x_{m,n}\|^2 \right\} \quad (13)$$

Burada $H_{m,n}$, $x_{m,n}$ sembol vektörünü etkileyen $N_r \times N_t$ boyutlu kanal matrisidir. Yukarıda verilen ifadede, Z^{N_t} adet alternatif sembol vektörü tek tek test edilerek, parantez içerisindeki Öklid mesafesini minimum yapan optimum sembol kombinasyonu bulunmaktadır. Bu nedenle, modülasyon seviyesi Z ve verici anteni sayısı N_t değerlerindeki artış, ML algoritmasının karmaşıklığında eksponansiyel bir büyümeye yol açacaktır. Bu çalışmada, oldukça düşük araştırma karmaşıklığı ile ML dedektörüne yakın bir sembol algılama performansı elde etmek için, öncelikle sembol algılama problemi ikili bir optimizasyon problemi haline dönüştürülmüş olup, önerilen DCS algoritması kullanılarak N_t uzunluklu sembol vektörleri optimize edilmiştir. Böylelikle, çok fazla işlem yüküne neden olmadan iteratif bir şekilde optimuma yakın bir çözüme ulaşmak mümkün hale gelmiştir.

Denklem (13)'te verilen ML tabanlı sembol algılama formülünde, $H_{m,n}$ ile ifade edilen gerçek kanal katsayılarının alıcı tarafından hatasız bir şekilde önceden bilindiği varsayılmaktadır. Ancak pratik sistemlerde gerçek kanal katsayılarının hatasız bir şekilde kestirilmesi çoğu zaman mümkün değildir. Bu çalışmada, bu durum göz önünde bulundurulmuş olup, MIMO-FBMC/OQAM sistemi kestirim hataları da hesaba katılarak modellenmiştir. Buna göre, ML tabanlı sembol algılama işlemi aşağıdaki gibi yeniden tanımlanmıştır:

$$x_{m,n}^* = \arg \min_{x_{m,n}} \left\{ \|y_{m,n} - \hat{H}_{m,n} \cdot x_{m,n}\|^2 \right\} \quad (14)$$

Yukarıdaki ifadede, hatalı bir şekilde kestirilen kanal katsayıları $\hat{H}_{m,n}$ ile temsil edilmektedir. Söz konusu hatalı kanal katsayıları aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır [19]:

$$\hat{H}_{m,n} = H_{m,n} + e \cdot \theta \quad (15)$$

Burada $H_{m,n}$, gerçek kanal katsayılarına karşılık gelirken, e kestirim hatası yüzdesini, θ ise sıfır ortalamalı ve birim varyanslı kompleks Gauss değişkenini ifade etmektedir.

4 Ayrık guguk kuşu arama (DCS) algoritması

Doğadaki guguk kuşu türleri, yavrularını büyütme sorumluluğundan tamamen kurtulmak amacıyla, farklı kuş türlerinin yuvalarına kendi yumurtalarını bırakırlar. Bunu yaparken, yuva sahibi kuşun yabancı yumurtayı fark etme olasılığını düşürmek için, kendi yumurtalarının renk ve dokusunu, yuvada yer alan diğer yumurtaların renk ve dokusuna benzetme yeteneği geliştirmişlerdir. Çünkü, yuva sahibi kuş yabancı yumurtayı fark ettiği takdirde, ya farklı bir bölgede yeni bir yuva yapmak üzere mevcut yuvasını terk etmekte ya da guguk kuşu tarafından bırakılmış olan yabancı yumurtayı yuvadan aşağı atarak kırmaktadır. Yavrularının başka bir kuş türü tarafından büyütülüp yetiştirileceği en uygun yuvayı bulmak amacıyla guguk kuşu türlerinin geliştirmiş olduğu karmaşık davranışlar aşağıdaki gibi idealize edilerek standart guguk kuşu arama (CS) algoritması geliştirilmiştir [20]:

1. Her bir guguk kuşu, rastgele seçmiş olduğu yuvaya her seferinde tek bir yumurta bırakır.
2. Yumurta bırakmaya uygun olan yüksek kaliteli yuvalar bir sonraki jenerasyona aktarılır.
3. Guguk kuşları tarafından yumurta bırakılabilecek yuva sayısı sabittir. Yuva sahibi kuşun yabancı yumurtayı fark etme olasılığı $p_a \in [0,1]$ şeklinde tanımlanır. Bu olasılığın gerçekleşmesi halinde yuva sahibi kuş başka bir pozisyonda yeni bir yuva inşa etmek üzere mevcut yuvasını terk eder ya da yabancı yumurtayı elimine ederek mevcut yuvasında kalmaya devam eder.

Guguk kuşu türlerinin sıra dışı üreme davranışlarından ilham alınarak geliştirilen guguk kuşu arama (CS) algoritması [20], farklı alanlarda vermiş olduğu başarılı sonuçlar nedeniyle sürü zekâsı tabanlı meta-sezgisel algoritmalar arasındaki popüleritesini hızla artırmıştır. Ancak söz konusu algoritmanın standart versiyonu sadece sürekli optimizasyon problemleriyle uyumludur. Bu nedenle, orijinal CS algoritmasını kullanarak ayrık bir optimizasyon problemi olan sembol algılama problemini direk olarak ayrık uzayda etkin bir şekilde çözmek mümkün değildir. Bu durumu göz önünde bulundurarak, ayrık uzayda QAM sembol vektörlerini ikili bir optimizasyon işlemine tabi tutup optimum çözüme hızlı bir şekilde yakınsayabilmek için CS algoritmasının DCS [10] isimli etkili bir ayrık versiyonu kullanılmıştır. DCS algoritmasında mevcut popülasyondaki guguk kuşu (veya yuva) pozisyonları aşağıda verilen vektör ile temsil edilmektedir:

$$c_s^{(d)} = [c_s^{(1)}, c_s^{(2)}, \dots, c_s^{(D)}] \quad , \quad s = 1, 2, \dots, S \quad (16)$$

Burada $c_s^{(d)} \in \{0, 1\}$ olup, yukarıda ifade edilen D -boyutlu pozisyon vektörü D adet 0 ve 1'lerden oluşmaktadır. Bunun haricinde S parametresi, toplam guguk kuşu (veya yuva) sayısını belirtmektedir.

4.1 Başlangıç pozisyonlarının oluşturulması

Başlangıç guguk kuşu popülasyonunu oluşturmak için rastgele S farklı pozisyon vektörü üretilir. Ardından rastgele üretilmiş olan her bir pozisyon vektörünün uygunluk değeri hesaplanır. Uygunluk hesabı yapılırken, DCS algoritmasının uygulanmış olduğu probleme ait amaç fonksiyonu kullanılır.

4.2 Yeni pozisyon üretimi

Mevcut guguk kuşu popülasyonu içerisinde rastgele bir pozisyon vektörü seçilir. Rastgele seçilmiş olan söz konusu pozisyon vektörü aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$c_r^{(d)} = [c_r^{(1)}, c_r^{(2)}, \dots, c_r^{(D)}] \quad , \quad d = 1, 2, \dots, D \quad (17)$$

Burada r değişkeni, $[1, S]$ aralığında üretilen rastgele bir değişkendir. Daha sonra, döngüsel bit çevirme prosedürü [21] kullanılarak $c_r^{(d)}$ vektöründen yeni bir pozisyon vektörü üretilir. Bu amaçla ilk olarak, seçilmiş olan pozisyon vektörüne aşağıdaki gibi bit çevirme işlemi uygulanır:

$$c_r^{(d),yeni} = flip(c_r^{(d)})_{\theta_r} \quad (18)$$

Burada θ_r , rastgele seçilen $c_r^{(d)}$ vektörünün bit çevirme indisidir. Yukarıda verilen $flip(\cdot)_{\theta_r}$ operatörü, $c_r^{(d)}$ vektörünün θ_r 'inci elementini 1'den 0'a ya da 0'dan 1'e dönüştürmektedir. DCS algoritmasında, bit çevirme indislerinin başlangıç değerleri $\theta_s = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_S] = [1, 1, \dots, 1]$ şeklinde tayin edilmektedir. Bu yüzden, rastgele seçilmiş pozisyon vektörünün bit çevirme indisine karşılık gelen θ_r parametresinin ilk değeri de diğer bit çevirme indislerinin gibi 1'e eşit olacaktır. Bit çevirme işleminin hemen ardından θ_r değeri aşağıdaki gibi güncellenir:

$$\theta_r = \theta_r + 1 \quad (19)$$

Böylelikle, Denklem (18)'de elde edilen yeni pozisyon vektörünün ilerleyen iterasyonlarda komşu çözüm üretmek üzere yeniden seçilmesi durumunda, bit çevirme işleminin bir sonraki vektör bileşeninden devam etmesi sağlanmaktadır. Bit çevirme işleminin döngüsel bir şekilde ilerleyebilmesi için, θ_r bit çevirme indisi 1 artırıldıktan hemen sonra aşağıdaki işleme tabi tutulur:

$$\theta_r = \text{mod}(\theta_r - 1, D) + 1 \quad (20)$$

Burada θ_r indisinin değeri, mod alma operatörü kullanılarak kontrol altında tutulmaktadır. θ_r değeri, D değerini her aştığında, Denklem (20)'de verilen kontrol mekanizması sayesinde tekrardan başlangıç değerine yani 1'e eşitlenir. Örneğin, θ_r indis değeri $D + 1$ 'e çıktığı anda, Denklem (20)'de verilen ifade, $\theta_r = \text{mod}(D, D) + 1$ haline

dönüşecektir. Bu durumda, $\text{mod}(D, D)$ 0'a eşit olduğundan dolayı, θ_r 'nin değeri tekrardan 1'e yani başlangıç değerine döndürülecektir. Böylelikle, iterasyonlar ilerledikçe, bit çevirme işlemi döngüsel bir şekilde ilerleyecektir.

Bit çevirme indisi güncellenip kontrol mekanizmasından geçirildikten sonra, yeni üretilen pozisyon vektörünün uygunluk değeri hesaplanır. $c_r^{(d),yeni}$ vektörünün uygunluk değeri $c_r^{(d)}$ vektörünün uygunluk değerinden daha iyi ise, $c_r^{(d),yeni}$ vektörü, $c_r^{(d)}$ vektörünün yerini alır. Ters durumda, herhangi bir değişiklik yapılmaz.

4.3 Yabancı yumurtanın fark edilmesi

Bu aşamada, ilk olarak $r_1 \in [0, 1]$ aralığında olacak şekilde rastgele bir sayı üretilir. Eğer üretilen r_1 sayısının değeri, yabancı yumurtayı ayırt etme olasılığını tayin eden p_a katsayısından küçükse, guguk kuşu popülasyonunda güncel olarak en kötü uygunluk değerine sahip olan pozisyon vektörü yerine rastgele bir çözüm vektörü üretilir. Bu işlemin ardından 4.2 aşamasından devam edilerek bir sonraki iterasyonu geçilir.

5 Ayırık guguk kuşu arama (DCS) tabanlı ML stratejisi

Bir önceki bölümden de açıkça anlaşılacağı üzere DCS algoritması, ikili araştırma uzayında çözülebilen ayırık optimizasyon problemleri için geliştirilmiş bir algoritmadır. Ancak, sembol algılama probleminde optimize edilecek olan $x_{m,n} = [x_{m,n}^{(1)}, x_{m,n}^{(2)}, \dots, x_{m,n}^{(N_r)}]^T$ sembol vektörleri, karmaşık değerli QAM sembollerinden oluştuğu için, ilgili vektörler DCS algoritması ile direk olarak ikili optimizasyon işlemine tabi tutulamamaktadır. Öte yandan, karmaşık sayılardan oluşan söz konusu sembol vektörlerini ikili bit dizileri haline dönüştürüp ikili araştırma uzayında optimizasyon işlemine uygun hale getirmek mümkündür. QAM modülasyon tekniğinde, $x_{m,n}$ vektöründe yer alan karmaşık değerli her bir QAM sembolü, $\log_2^Z = k$ basamaklı belirli bir ikili sayıya karşılık gelmektedir. Dolayısıyla, her bir QAM sembolü yerine eşdeğeri olan ikili sayı kullanıldığı takdirde, karmaşık sayılardan oluşan QAM sembol vektörleri ikili bit dizileri haline dönüştürülebilmektedir. Böylelikle, sembol optimizasyonu işlemi DCS algoritmasını kullanarak doğrudan ikili araştırma uzayında gerçekleştirmek mümkün hale gelmektedir. Önerilen DCS-ML stratejisinde, karmaşık değerli QAM sembol vektörleri ve ilgili vektörlerin eşdeğeri olan ikili bit dizileri aşağıdaki gibi guguk kuşu pozisyonları şeklinde ifade edilmektedir:

$$x_s^{(i)} = [x_s^{(1)}, x_s^{(2)}, \dots, x_s^{(N_r)}] \quad , \quad s = 1, 2, \dots, S \quad (21)$$

$$b_s^{(j)} = [b_s^{(1)}, b_s^{(2)}, \dots, b_s^{(k \cdot N_r)}] \quad , \quad s = 1, 2, \dots, S \quad (22)$$

$x_s^{(i)}$ vektöründeki her bir karmaşık sembol k adet bit taşıdığı için, söz konusu vektörün Denklem (22)'de verilen ikili eşdeğerinin içerdiği toplam bit sayısı $k \cdot N_r$

olmaktadır. DCS-ML stratejisine ait işlem adımları aşağıda verilmiştir:

Adım 1: İlk olarak, **Denklem (22)**'deki gibi ikili bit dizileri formunda rastgele S adet QAM sembol vektörü üretilerek başlangıç guguk kuşu popülasyonu oluşturulur.

Adım 2: Rastgele üretilen başlangıç popülasyon üyelerinin her biri uygunluk hesabına tabi tutulur. Bu işlem iki aşamada gerçekleştirilir: İlk aşamada, ilgili popülasyon üyesini temsil eden $b_s^{(j)}$ ikili bit dizisi, kendi eşdeğeri olan karmaşık değerli $x_s^{(i)}$ QAM sembol vektörü haline dönüştürülür. İkinci aşamada ise, elde edilen $x_s^{(i)}$ sembol vektörü aşağıda verilen uygunluk fonksiyonunda kullanılarak ilgili popülasyon üyesinin uygunluk değeri hesaplanır:

$$f_s = \text{fit}(x_s^{(i)}) = \|y_{m,n} - \hat{H}_{m,n} \cdot x_s^{(i)}\|^2 \quad (23)$$

$$s = 1, 2, \dots, S; \quad i = 1, 2, \dots, N_i$$

Burada f_s , guguk kuşu popülasyonundaki s 'inci bireyin uygunluk değerini ifade etmektedir.

Adım 3: Popülasyon içerisinde rastgele bir üye (r 'inci guguk kuşu: $b_r^{(j)}$) seçilir. Söz konusu popülasyon üyesi aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$b_r^{(j)} = [b_r^{(1)}, b_r^{(2)}, \dots, b_r^{(k \cdot N_i)}] \quad , \quad j = 1, 2, \dots, k \cdot N_i \quad (24)$$

Adım 4: Rastgele seçilen $b_r^{(j)}$ vektörü üzerinde bit çevirme işlemi gerçekleştirilerek yeni bir çözüm üretilir:

$$b_r^{(j), \text{yeni}} = \text{flip}(b_r^{(j)})_{\theta_r} \quad (25)$$

Sonrasında, bit çevirme işleminin döngüsel bir şekilde devam etmesini sağlamak amacıyla sırasıyla aşağıdaki işlemler yerine getirilir:

$$\theta_r = \theta_r + 1 \quad (26)$$

$$\theta_r = \text{mod}(\theta_r - 1, k \cdot N_i) + 1 \quad (27)$$

Daha sonra, yeni üretilen $b_r^{(j), \text{yeni}}$ çözümü uygunluk kalitesi bakımından değerlendirilir. Bunun için, öncelikle söz konusu $b_r^{(j), \text{yeni}} = [b_r^{(1), \text{yeni}}, b_r^{(2), \text{yeni}}, \dots, b_r^{(k \cdot N_i), \text{yeni}}]$ ikili çözüm vektörü, kendisine karşılık gelen karmaşık değerli $x_r^{(i), \text{yeni}} = [x_r^{(1), \text{yeni}}, x_r^{(2), \text{yeni}}, \dots, x_r^{(N_i), \text{yeni}}]$ QAM sembol vektörü haline dönüştürülür. Ardından ilgili yeni çözümün uygunluk değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$f_r^{\text{yeni}} = \text{fit}(x_r^{(i), \text{yeni}}) = \|y_{m,n} - \hat{H}_{m,n} \cdot x_r^{(i), \text{yeni}}\|^2 \quad (28)$$

Burada f_r^{yeni} , yeni üretilen çözümün uygunluk değerini belirtmektedir. $b_r^{(j), \text{yeni}}$ çözümü, $b_r^{(j)}$ çözümüne göre daha iyi bir uygunluk değerine sahipse, eski çözümün yerini yeni çözüm alır. Bit çevirme işlemi sonrası $b_r^{(j)}$ çözümünün uygunluk değerinde herhangi bir iyileşme elde edilememişse, ilgili çözüm olduğu gibi bırakılarak herhangi bir güncelleme yapılmaz.

Adım 5: $[0, 1]$ aralığında rastgele bir r_1 sayısı üretilir. Eğer $r_1 < p_a$ ise, mevcut popülasyondaki en kötü uygunluk değerine sahip çözüm vektörünün yerine rastgele bir çözüm üretilir.

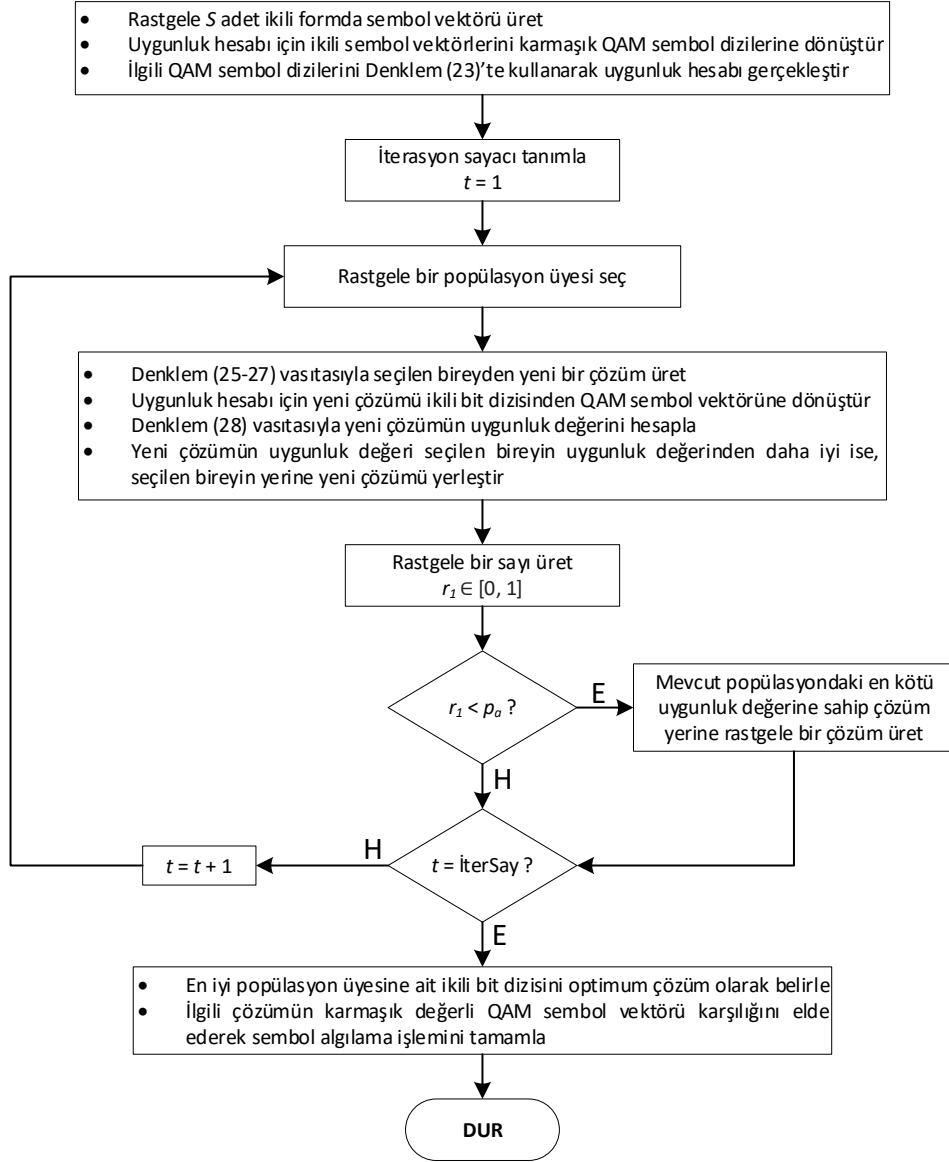
Adım 6: Bir sonraki iterasyona geçmek için Adım 3'ten devam edilir. Adım 3 - Adım 5 arasındaki işlemler, durdurma kriteri olarak belirlenen maksimum iterasyon sayısına (İterSay) ulaşıncaya kadar tekrarlanır. Durdurma kriteri sağlandıktan sonra, en iyi uygunluk değerine sahip olan ikili pozisyon vektörü, optimum çözüm olarak belirlenir. Son olarak, söz konusu ikili bit dizisine karşılık gelen QAM sembol dizisi elde edilerek optimum sembol vektörü elde edilir. Bu son işlemle birlikte sembol algılama işlemi tamamlanır. DCS-ML stratejisine ait akış diyagramı **Şekil 1**'de verilmiştir.

6 Simülasyon sonuçları

Bu bölümde, önerilen DCS-ML stratejisi ve diğer yöntemlerin MIMO-FBMC/OQAM sistemindeki sembol algılama performansları, ilgili metodlarının 4×4 , 6×6 ve 8×8 anten konfigürasyonlarındaki bit hata oranı başarımları karşılaştırılarak test edilmiştir. Bunun haricinde, DCS-ML prosedürünün optimum çözüme ne kadar hızlı bir şekilde yakınsadığını ortaya koyabilmek amacıyla, söz konusu anten konfigürasyonlarının her biri için yakınsama analizi gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda, $[-2.5, 0, -3, -5, -2, -4]$ dB güç yollarına ve $[0, 300, 1000, 1600, 5000, 6600]$ ns bağıl gecikmelere sahip "Cost 207 Bad Urban" kanal modeli kullanılmıştır. MIMO-FBMC/OQAM sistemi için belirlenen diğer parametre değerleri **Tablo 1**'de verilmiştir.

Tablo 1. MIMO-FBMC/OQAM sistem parametreleri

MIMO konfigürasyonları	$4 \times 4, 6 \times 6, 8 \times 8$
Alt taşıyıcı sayısı	$M = 64$
Taşıyıcı frekansı	2.5 GHz
Alt taşıyıcı aralığı	15 KHz
Prototip filtre modeli	PHYDYAS
QAM modülasyon seviyesi	$Z = 4$
FBMC sembolü sayısı	$N = 30$
Örtüşme faktörü	4
Kanal modeli	Cost 207 Bad Urban
Kestirim hatası yüzdesi	$e = 30\%$



Şekil 1. DCS-ML stratejisinin akış diyagramı

Tablo 2’de klasik ML yöntemi de dahil olmak üzere ML tabanlı sembol dedektörlerinin araştırma karmaşıklıkları sırasıyla 4×4, 6×6 ve 8×8 anten yapıları için analiz edilmiştir. Herhangi bir ML tabanlı sembol algılama stratejisinin araştırma karmaşıklığı tanımlanırken, optimum QAM sembol vektörü arayışı boyunca gerçekleştirilen Öklid hesabı sayısı dikkate alınır. Öklid mesafesinin nasıl hesaplandığı Denklem (13)’te verilmiştir. Klasik ML tekniğinde, alınan sinyalle minimum Öklid mesafesine sahip olan optimum QAM sembol dizisini bulmak için, olası her bir sembol kombinasyonu başına bir Öklid hesabı gerçekleştirilmektedir. Buna göre, ML yönteminde sembol algılama işlemi boyunca gerçekleştirilen toplam Öklid hesabı sayısı, Z^N ifadesi kullanılarak bulunabilen olası sembol kombinasyonlarının toplam sayısına eşit olacaktır. Bu nedenle, klasik ML dedektörünün araştırma karmaşıklığı

(SC), $SC = Z^N$ şeklinde tanımlanmaktadır. Burada Z, modülasyon seviyesini belirtirken N , verici anten sayısını ifade etmektedir. Metasezgisel tabanlı gelişmiş ML stratejilerinde ise, optimizasyon işlemi süresince QAM sembol vektörlerinin alınan sinyale olan Öklid mesafeleri bakımından değerlendirildiği toplam uygunluk hesabı sayısı, direkt olarak araştırma karmaşıklığını vermektedir. Hem DBHS-ML hem de DCS-ML stratejilerinde, popülasyon boyutundan bağımsız olarak her bir araştırma ya da iterasyon için tek bir uygunluk hesabı gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle ilgili sembol algılama stratejilerinde, araştırma karmaşıklığına karşılık gelen toplam uygunluk hesabı sayıları sırasıyla maksimum araştırma sayısı (ArSay) ve maksimum iterasyon sayısına (IterSay) eşit olmaktadır.

Anten sayısındaki artışla birlikte araştırma uzayında genişleme meydana geldiğinden dolayı daha yüksek

Tablo 2. ML tabanlı sembol algılama yöntemlerinin araştırma karmaşıklıkları

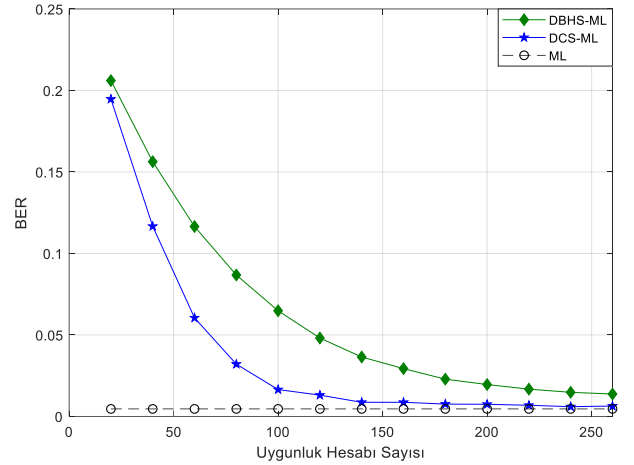
Yöntemler	4×4	6×6	8×8	
DBHS-ML	Harmoni sayısı	$HarSay = 20$	$HarSay = 30$	$HarSay = 40$
	Maksimum araştırma sayısı	$ArSay = 260$	$ArSay = 900$	$ArSay = 2200$
	Araştırma karmaşıklığı	$SC = ArSay = 260$	$SC = ArSay = 900$	$SC = ArSay = 2200$
	SNR = 12 dB için BER	0.01374	0.007995	0.004557
DCS-ML	Guguk kuşu sayısı	$S = 15$	$S = 20$	$S = 25$
	Maksimum iterasyon sayısı	$IterSay = 150$	$IterSay = 500$	$IterSay = 1000$
	Araştırma karmaşıklığı	$SC = IterSay = 150$	$SC = IterSay = 500$	$SC = IterSay = 1000$
	SNR = 12 dB için BER	0.008659	0.003498	0.001634
ML	Araştırma karmaşıklığı	$SC = Z^{N_i} = 4^4 = 256$	$SC = Z^{N_i} = 4^6 = 4096$	$SC = Z^{N_i} = 4^8 = 65536$
	SNR = 12 dB için BER	0.004596	0.002005	0.0006576

araştırma sayılarına ve daha büyük popülasyon boyutlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Örneğin 4×4, 6×6 ve 8×8 anten konfigürasyonları için, önerilen DCS-ML stratejisinin popülasyon boyutları 15, 20 ve 25 olarak seçilirken, karşılaştırma amaçlı kullanılan DBHS-ML stratejisinin popülasyon büyüklükleri sırasıyla 20, 30 ve 40 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, söz konusu anten konfigürasyonları için DCS-ML stratejisinin araştırma karmaşıklıkları sırasıyla 150, 500 ve 1000 olarak belirlenirken, DBHS-ML yönteminin araştırma karmaşıklıkları 260, 900, 2200 değerlerine ayarlanmıştır. DCS-ML yönteminin araştırma karmaşıklıkları, bit hata oranı başarımları ile araştırma karmaşıklığı arasındaki ödünleşim dikkate alınarak belirlenmiştir. Önerilen yöntemin ne kadar etkili bir performansa sahip olduğunu ortaya koymak amacıyla, diğer yöntemin araştırma karmaşıklıkları çok daha yüksek değerlere ayarlanmıştır. DCS-ML stratejisi, daha az araştırma yapma fırsatı verilerek dezavantajlı duruma düşürülmesine rağmen, çok daha iyi sonuçlara ulaşmış rakibini net bir şekilde geride bırakmıştır. Zeki optimizasyon tabanlı ML dedektörlerine ait diğer parametre değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Metasezgisel tabanlı ML dedektörlerinin simülasyon parametreleri

Yöntemler	Parametreler	Değerler
DBHS-ML	Harmoni hafızası değerlendirme oranı	$HMCR = 0.6$
	Perde ayarlama oranı	$PAR = 0.05$
DCS-ML	Yabancı yumurtayı ayırt etme olasılığı	$p_a = 0.25$

Şekil 2'de, mevcut metasezgisel tabanlı ML stratejilerinin 4×4 anten konfigürasyonu için 12 dB SNR değerindeki yakınsama eğrileri elde edilmiştir. Bunun için ilgili stratejiler her bir uygunluk hesabı sayısı için 10 defa koşuturulmuştur. Böylelikle, her bir uygunluk hesabı için 10 farklı BER değeri elde edilmiştir. Şekil 2'de görülen yakınsama eğrileri, söz konusu BER değerlerinin ortalaması



Şekil 2. Metasezgisel tabanlı sembol dedektörlerinin 4×4 MIMO-FBMC/OQAM sistemindeki yakınsama performansı

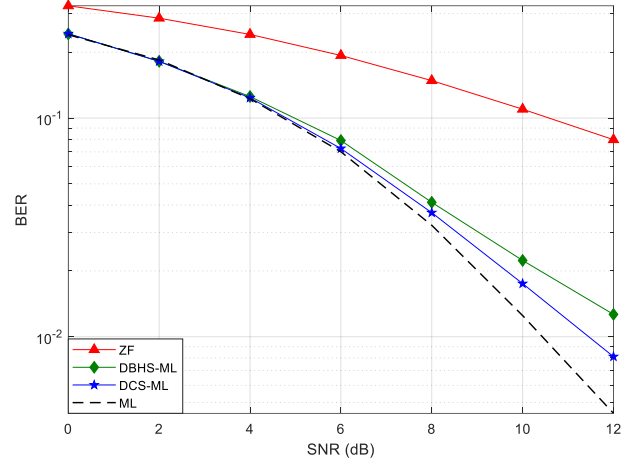
olarak oluşturulmuştur. En altta yer alan doğru ise, ML dedektörü tarafından kapsamlı arama sonucu ulaşılan en düşük BER seviyesidir. Herhangi bir zeki optimizasyon tabanlı sembol dedektöründe amaç, mümkün olduğunca az sayıda uygunluk hesabı gerçekleştirerek en düşük BER seviyesine yakınsamak olmalıdır. Şekil 2'den de açıkça görüleceği üzere, önerilen DCS-ML sembol dedektörü çok hızlı bir şekilde optimum sonuca yakınsamaktadır. Karşılaştırma amaçlı kullanılan diğer yöntem ise, 260 uygunluk hesabı sonrasında bile optimum BER seviyesine yeterince yaklaşamamıştır. Örneğin, DBHS-ML yönteminin 260 adet uygunluk hesabı sonucu ulaşılmış olduğu 0.01374 BER seviyesine, DCS-ML yöntemi kullanılarak sadece 116 adet uygunluk hesabı ile ulaşılabilmektedir. Daha önce de bahsedildiği gibi, önerilen yöntem için uygunluk hesabı sayısı belirlenirken BER performansı ile araştırma karmaşıklığı arasındaki ödünleşim dikkate alınmıştır. Şekil 2'de görüldüğü gibi, önerilen DCS-ML stratejisinin yakınsama davranışı 150 uygunluk hesabı sayısında neredeyse tamamlanmıştır. Bu nedenle, söz konusu ödünleşim dikkate alınarak, 4×4 MIMO yapısı için ilgili stratejinin araştırma karmaşıklığı 150 olarak ayarlanırken,

DBHS-ML yönteminin araştırma karmaşıklığı 260'a sabitlenmiştir.

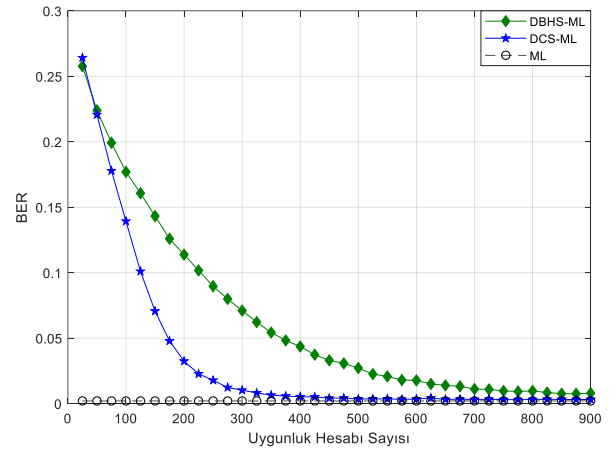
Şekil 3'te, makalede ele alınan sembol algılama stratejileri 4×4 MIMO-FBMC/OQAM sistemindeki bit hata oranı başarımları bakımından birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Şekilden de açıkça görüleceği üzere, ZF tekniği BER performansı bakımından diğer yöntemlerin oldukça gerisinde kalırken, sistem karmaşıklığında aşırı bir artışa neden olan ML dedektörü beklenildiği üzere en düşük BER seviyesine ulaşan yöntem olmuştur. Öte yandan, önerilen DCS-ML stratejisi, diğer metasezgisel tabanlı sembol dedektörünü net bir şekilde geride bırakarak ML yöntemine yakın bir performans sergilemiştir. Üstelik bu üstün performansına, DBHS-ML yöntemine göre oldukça düşük sayıda uygunluk hesabı gerçekleştirerek ulaşmıştır.

Şekil 4'te, zeki optimizasyon tabanlı ML stratejilerinin yakınsama eğrileri 6×6 anten konfigürasyonu için elde edilmiştir. Şekil 2 ile Şekil 4 karşılaştırıldığında da görülebileceği gibi, MIMO konfigürasyonunun 4×4'ten 6×6'ya yükseltilmesi, her bir stratejinin optimum çözüme yakınsamak için daha fazla uygunluk hesabına ihtiyaç duymasına neden olmuştur. Şekil 4'te net bir şekilde görüldüğü üzere, önerilen DCS-ML stratejisi, karşılaştırma amaçlı kullanılan DBHS-ML yöntemine oranla çok daha iyi bir yakınsama performansı sergilemiş olup, söz konusu yöntemle göre daha az uygunluk hesabı ile daha düşük bir BER seviyesine ulaşmıştır. Farklı bir açıdan bakacak olursak, DCS-ML stratejisi vasıtasıyla çok daha az sayıda uygunluk hesabı gerçekleştirerek DBHS-ML yöntemi ile aynı BER seviyesine ulaşmak mümkündür. Örneğin DBHS-ML yöntemi, 0.007995 BER seviyesine ulaşmak için 900 adet uygunluk hesabına ihtiyaç duyarken, DCS-ML yönteminin söz konusu BER değerine ulaşması için 327 sayıda uygunluk hesabı yeterli olmaktadır. Önerilen sembol algılama stratejisi, yaklaşık olarak 500. uygunluk hesabında doyuma ulaştığından dolayı, ilgili stratejinin 6×6 anten konfigürasyonundaki uygunluk hesabı sayısı 500 olarak tayin edilmiştir. Böylelikle, gereğinden fazla araştırma karmaşıklığından kaçınılmıştır.

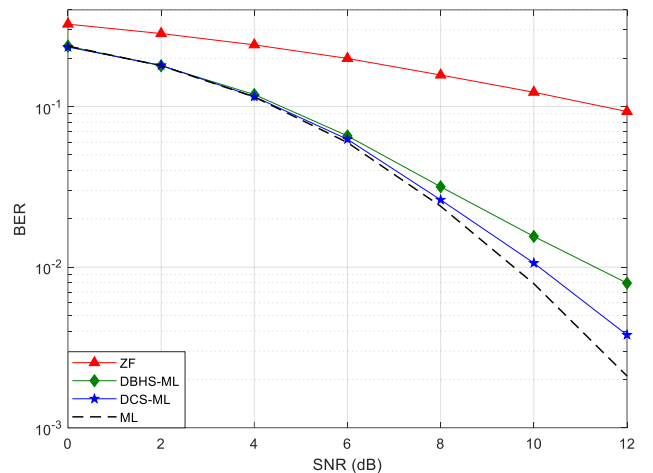
Şekil 5'te, sembol dedektörlerinin MIMO-FBMC/OQAM sistemindeki BER başarımları, 6×6 anten konfigürasyonu için incelenmiştir. Şekil 3 ile Şekil 5 karşılaştırıldığında, anten yapısının 4×4'ten 6×6'ya yükseltilmesi ile birlikte, bir tür lineer sembol dedektörü olması sebebiyle anten sayısındaki artıştan olumsuz olarak etkilenen ZF dedektörü haricinde, her bir sembol dedektörünün BER performansında hatırı sayılır bir iyileşme meydana geldiği görülecektir. Anten konfigürasyonundaki söz konusu artışa rağmen önerilen DCS-ML stratejisi, ML dedektörü tarafından elde edilen optimum BER sonuçlarına en çok yaklaşan yöntem olarak diğer yöntemlere olan üstünlüğünü korumuştur. Örneğin, ZF ve DBHS-ML dedektörlerinin 10 dB SNR değerindeki BER seviyeleri sırasıyla 1.23×10^{-1} ve 1.55×10^{-2} iken, DCS-ML stratejisinin aynı SNR değeri için ulaşmış olduğu BER seviyesi 1.06×10^{-2} 'dir.



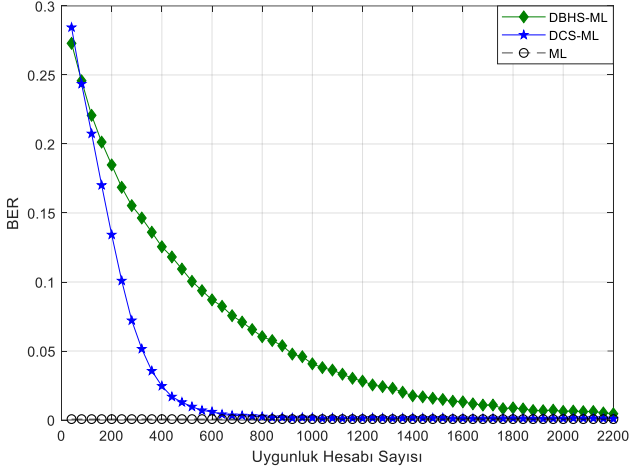
Şekil 3. Sembol dedektörlerinin 4×4 MIMO-FBMC/OQAM sistemi için BER performans analizi



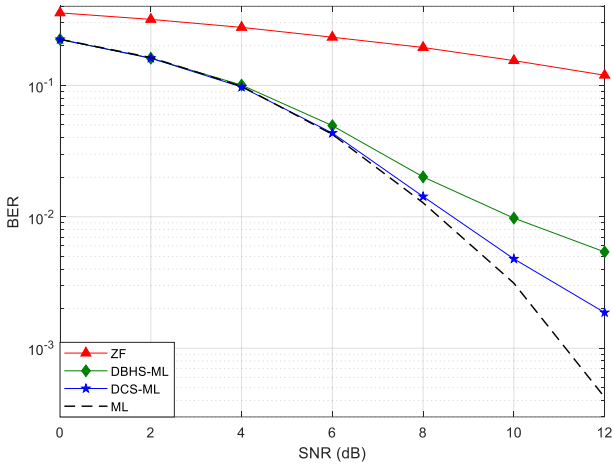
Şekil 4. Metasezgisel tabanlı sembol dedektörlerinin 6×6 MIMO-FBMC/OQAM sistemindeki yakınsama performansı



Şekil 5. Sembol dedektörlerinin 6×6 MIMO-FBMC/OQAM sistemi için BER performans analizi



Şekil 6. Metasezgisel tabanlı sembol dedektörlerinin 8x8 MIMO-FBMC/OQAM sistemindeki yakınsama performansı



Şekil 7. Sembol dedektörlerinin 8x8 MIMO-FBMC/OQAM sistemi için BER performans analizi

Şekil 6'da, mevcut zeki optimizasyon tabanlı sembol algılama stratejilerinin yakınsama performansları 8x8 anten yapısı için karşılaştırılmıştır. Yakınsama eğrilerinden de anlaşılacağı üzere, DCS-ML stratejisi yaklaşık olarak 1000 adet uygunluk hesabı sonucunda optimum çözüme tamamen yakınsamaktadır. Bu nedenle önerilen yöntemin araştırma karmaşıklığı 1000 olarak ayarlanmıştır. Diğer taraftan DBHS-ML dedektörünün, DCS-ML stratejisinin sadece 1000 uygunluk hesabı ile ulaşılmış olduğu BER seviyesine erişebilmesi için 2200 adet uygunluk hesabı bile yeterli gelmemiştir. Bununla birlikte, DBHS-ML yönteminin 2200 uygunluk hesabı sonucunda ulaşılmış olduğu BER sonucuna DCS-ML stratejisi ile çok daha az sayıda uygunluk hesabı ile ulaşılabilmektedir. Örneğin, DBHS-ML dedektörünün 0.004557 BER seviyesine ulaşabilmesi için 2200 adet uygunluk hesabı gerekirken, önerilen sembol algılama stratejisi kullanılarak aynı BER seviyesine sadece 630 uygunluk hesabı ile ulaşmak mümkün olabilmektedir.

Şekil 7'de, her bir sembol algılama stratejisinin SNR(dB)-BER eğrisi 8x8 MIMO konfigürasyonu için elde edilmiştir. Daha önce de bahsedildiği üzere, MIMO-

FBMC/OQAM verici ve alıcısına eklenen her bir anten, araştırma uzayında üstel bir artışa neden olmaktadır. Bu nedenle, anten sayısındaki her bir artış, metasezgisel tabanlı sembol algılama stratejilerinin kabul edilebilir bir çözüme ulaşabilmeleri için daha fazla sayıda uygunluk hesabı gerçekleştirmelerini zorunlu kılmaktadır. Önerilen DCS-ML sembol dedektörü, 4x4 ve 6x6 anten yapılarında olduğu gibi, 8x8 anten yapısında da üstün bir sembol algılama performansı sergilemiştir. En yakın rakibi olan DBHS-ML yöntemine bit hata oranı seviyesi bakımından ciddi bir fark atmıştır. Üstelik bunu rakibine oranla çok daha az sayıda uygunluk hesabı gerçekleştirerek başarmıştır.

7 Sonuç

Bu çalışmada, guguk kuşu arama algoritmasının DCS olarak adlandırılan etkili bir ayrık versiyonu geleneksel ML yöntemine entegre edilerek DCS-ML isimli yeni bir sembol algılama stratejisi geliştirilmiş olup, söz konusu strateji kullanılarak çok daha az araştırma karmaşıklığı ile optimuma yakın bir sembol algılama performansı elde etmek mümkün hale gelmiştir. Geliştirilmiş olan DCS-ML stratejisinin sembol algılama performansı, MIMO-FBMC/OQAM sisteminde test edilmiştir. Bunun için, ilgili stratejinin 4x4, 6x6 ve 8x8 anten konfigürasyonlarındaki bit hata oranı başarımları incelenmiştir. Söz konusu performans analizinde, ZF ve ML gibi yaygın olarak bilinen geleneksel sembol dedektörlerinin yanı sıra, DBHS-ML isimli gelişmiş bir metasezgisel tabanlı sembol algılama yöntemi karşılaştırma amaçlı kullanılmıştır. Makalede ele alınan yöntemlerin sembol algılama performanslarını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarına göre, önerilen DCS-ML stratejisi, her bir anten konfigürasyonu için, geleneksel ML yöntemi ile elde edilebilen optimum BER seviyesine, diğer iki yöntemle oranla daha çok yaklaşmıştır. Göstermiş olduğu yüksek sembol algılama performansı sayesinde hem klasik ZF hem de DBHS-ML yönteminden daha düşük BER seviyelerine ulaşarak söz konusu yöntemler üzerinde net bir üstünlük kurmuştur.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

- [1] L. J. Cimini, Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing. IEEE Transactions on Communications, 33 (7), 665-675, 1985. <https://doi.org/10.1109/TCOM.1985.1096357>.
- [2] M. Yıldırım, Subcarrier-interactive dual-mode OFDM. IEEE Communications Letters, 27 (5), 1472-1476, 2023. <https://doi.org/10.1109/lcomm.2023.3248523>.
- [3] Y. Kabalcı, 5g iletişim sistemleri için aday iletim tekniklerinin bit hata oranı başarımlarının araştırılması. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9 (2), 821-831, 2020. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.654386>.

- [4] B. Farhang-Boroujeny, Filter bank multicarrier modulation: A waveform candidate for 5G and beyond. *Advances in Electrical Engineering*, 2014, 1-25, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/482805>.
- [5] R. Nissel, S. Schwarz and M. Rupp, Filter bank multicarrier modulation schemes for future mobile communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 35 (8), 1768-1782, 2017. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2710022>.
- [6] R. Zakaria and D. Le Ruyet, On maximum likelihood MIMO detection in QAM-FBMC systems. 21st Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, pp. 183-187, Istanbul, Turkey, 2010.
- [7] R. Nissel, J. Blumenstein and M. Rupp, Block frequency spreading: A method for low-complexity MIMO in FBMC-OQAM. *IEEE 18th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, pp. 1-5, Sapporo, Japan, 2017.
- [8] Q. H. Spencer, A. L. Swindlehurst and M. Haardt, Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 52 (2), 461-471, 2004. <https://doi.org/10.1109/TSP.2003.821107>.
- [9] X. Zhu and R. D. Murch, Performance analysis of maximum likelihood detection in a MIMO antenna system. *IEEE Transactions on Communications*, 50 (2), 187-191, 2002. <https://doi.org/10.1109/26.983313>.
- [10] Ş. Şimşir and N. Taşpınar, A novel discrete cuckoo search algorithm-based selective mapping technique to minimize the peak-to-average power ratio of universal filtered multicarrier signal. *International Journal of Communication Systems*, 33 (18), 1-16, 2020. <https://doi.org/10.1002/dac.4640>.
- [11] X. Kong, L. Gao, H. Ouyang and S. Li, A simplified binary harmony search algorithm for large scale 0-1 knapsack problems. *Expert Systems with Applications*, 42 (12), 5337-5355, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.02.015>.
- [12] M. N. Seyman, Symbol detection based on back tracking search algorithm in MIMO-NOMA systems. *Computer Systems Science & Engineering*, 40 (2), 795-804, 2022. <http://dx.doi.org/10.32604/CSSE.2022.019734>.
- [13] H. U. Rehman, S. I. Shah, I. Zaka and J. Ahmad, An MBER-BLAST algorithm for OFDM-SDMA communication using particle swarm optimization. *International Journal of Communication Systems*, 24 (2), 185-201, 2011. <https://doi.org/10.1002/dac.1149>.
- [14] A. A. Khan, S. Bashir, M. Naeem, S. I. Shah and X. Li, Symbol detection in spatial multiplexing system using particle swarm optimization meta-heuristics. *International Journal of Communication Systems*, 21 (12), 1239-1257, 2008. <https://doi.org/10.1002/dac.949>
- [15] M. Mandloi and V. Bhatia, A low-complexity hybrid algorithm based on particle swarm and ant colony optimization for large-MIMO detection. *Expert Systems with Applications*, 50, 66-74, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.12.008>.
- [16] L. Li, W. Meng and S. Ju, A novel artificial bee colony detection algorithm for massive MIMO system. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 16 (17), 3139-3152, 2016. <https://doi.org/10.1002/wcm.2754>.
- [17] M. N. Seyman and N. Taşpınar, Symbol detection using the differential evolution algorithm in MIMO-OFDM systems. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 21 (2), 373-380, 2013. <https://doi.org/10.3906/elk-1103-16>.
- [18] S. Chen and Y. Wu, Maximum likelihood joint channel and data estimation using genetic algorithms. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 46 (5), 1469-1473, 1998. <https://doi.org/10.1109/78.668813>.
- [19] C. Wang, E. K. S. Au, R. D. Murch, W. H. Mow, R. S. Cheng and V. Lau, On the performance of the MIMO zero-forcing receiver in the presence of channel estimation error. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 6 (3), 805-810, 2007. <https://doi.org/10.1109/TWC.2007.05384>.
- [20] X. S. Yang and S. Deb, Cuckoo search via Lévy flights. 2009 World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC), pp. 210-214, Coimbatore, India, 2009.
- [21] T. T. Nguyen and L. Lampe, On partial transmit sequences for PAR reduction in OFDM systems. *Transactions on Wireless Communications*, 7 (2), 746-755, 2008. <https://doi.org/10.1109/TWC.2008.060664>.





Machine learning-based identification of the strongest predictive features of scoring penalty kick in football

Futbolda başarılı penaltı atışı için en güçlü belirleyici özniteliklerin makine öğrenimi tabanlı tespiti

Ural Akıncıoğlu^{1,*} , Önder Aydemir² , Ahmet Çil³ 

^{1,3} Karadeniz Technical University, Faculty of Technology, Electronics and Communication Engineering, 61830, Trabzon, Türkiye

² Karadeniz Technical University, Electrical and Electronics Engineering, 61080, Trabzon, Türkiye

Abstract

In football, the penalty is the situation that has one of the highest chances of scoring a goal. However, the success of a penalty kick highly depends on many kinds of attributes, including the penalty-takers' abilities, the amount of fan pressure, the minute of the match, and the current score. In this paper, 16 features were extracted from penalty kick positions, penalty-takers' information, and match-day preferences, and machine learning was used to predict penalty kick outcomes. Moreover, we revealed the most important feature combination that significantly affected the success of a penalty kick. The proposed method was trained with 120 and tested with 50 penalty kicks from the Turkish Super League in terms of classification accuracy and polygon area metric. We concluded that the result of a penalty kick can be predicted with an average classification accuracy and average polygon area metric rates of 79.80% and 0.60 using the k -nearest neighbor classifier.

Keywords: Football, machine learning, penalty kick, polygon area metric, classification

1 Introduction

Technology is advancing day by day in the world. The developments in hardware and software are also increasing with the advancement of technology. These developments allow different algorithms to be used in various fields. Pattern recognition and machine learning algorithms are especially used in many areas, from medicine to finance, engineering to agriculture, in daily life. Moreover, the speed of these algorithms increases with advanced hardware. By the help of these algorithms, optimum solutions can be offered, and quick decisions can be taken. These are also used more and more in sports. Machine learning has been used in various studies of different sports branches. It is used to increase the training variety in chess, which is a strategy game [1]. In martial arts such as karate and taekwondo, it is used for predicting winners [2], classifying two taekwondo kick techniques [3], and accuracy analysis of movements [4]. In sports such as basketball, volleyball, rugby and football which are played with ball, it is used for predicting winners [5], classification of tactical behaviors [6], recommending a

Öz

Penaltı, futbolda gol atma şansının en yüksek olduğu durumlardan bir tanesidir. Bir penaltı vuruşunun başarısı penaltıyı kullananların yetenekleri, taraftar baskısının seviyesi, maçın dakikası ve mevcut skor dahil olmak üzere birçok etkene bağlı değişkenlik gösterir. Bu makalede, penaltı pozisyonlarından, penaltıyı kullananların bilgilerinden ve maç günü tercihlerinden 16 öznitelik çıkarılmıştır. Çıkarılan öznitelikler, makine öğrenimi aracılığıyla penaltı vuruşu sonucunu tahmin etmek için kullanılmıştır. Ayrıca bir penaltı vuruşunun başarısını büyük ölçüde etkileyen en önemli öznitelik kombinasyonu elde edilmiştir. Önerilen yöntem, Türkiye Süper Ligi'nden 120 penaltı vuruşu ile eğitilirken 50 penaltı vuruşu ile sınıflandırma doğruluğu ve poligon alanı metriği açısından test edilmiştir. Penaltı vuruşu sonucunun, k -en yakın komşu sınıflandırıcısı kullanılarak %79.80 ortalama sınıflandırma doğruluğu ve 0.60 ortalama poligon alanı metriği oranlarıyla tahmin edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Futbol, makine öğrenmesi, penaltı atışı, poligon alan metriği, sınıflandırma

relational-learning-based approach to identify different strategies based on optical tracking data [7], increasing training efficiency [8-11], athlete-specific injury status monitoring [12], wonderkid prediction [13], determining the factors of affecting success [14], referee performance analysis [15], match result prediction [16-18], understanding and estimating the risk of injury [19, 20], improving the offensive game [21], determining the position of the football player [22, 23], increasing the game advantage by predicting the opponent's substitutions [24], estimating the value of football players in the transfer market [25], player selection and team building [26], estimating the match result from player performances [27], predicting the recovery time of professional football players after an undiagnosed injury [28] and classification of passes [29].

Today, football has started to take its place among the most critical sectors expressed in huge numbers economically and commercially [30]. Success is necessary for teams to get more shares from this ever-growing industry. As the success increases, the number of supporters will

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: uralakincioglu@ktu.edu.tr (U. Akıncıoğlu)

Geliş / Received: 17.05.2024 Kabul / Accepted: 20.08.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1485962

increase, so economic and commercial development will also be achieved. To achieve sportive success, clubs make investments with large budgets such as player transfers, manager/coaching team agreements, youth team expenditures, training facility/stadium constructions or maintenance costs of existing ones, technological training equipment purchases, etc. The primary purpose of these investments, expenses, and training is to win matches. To reach this aim, achieving more goal(s) than the opponent is necessary. One of the closest positions to the goal is the penalty kick. In short, making a difference by increasing the percentage of goal scoring in penalty kicks is very effective on the way to success, which is the target.

Penalty kicks have been researched from various perspectives in the literature. Timmis et al. [31] recorded the data from 12 participants who wore an eye-tracking device while taking penalty kicks. They found significant differences between goals and missed penalty kicks in the quiet eye (QE). As a result of their research, the QE period was effective for the penalty kick to be scored. Missed penalty kicks had shorter QE periods and earlier QE offsets. In addition, missed penalty kicks were taken more centrally, and the goalkeeper saved the ball more easily. In another study, Ellis and Ward [32] researched the effect of high and low pressure of supporters on the penalty kicker's performance, psychology, and psychophysiological response. Data were recorded from 20 professional football players under high-pressure and low-pressure situations. A questionnaire was applied to measure the stressful situations, and the respiratory and heart rates of the football players were acquired via sensors. In addition, the players were asked to hit the targets for accuracy detection. In the case of high-pressure situations, the penalty kickers listened to the sounds from the headphones. These were the supporters' sounds that were recorded in major football tournaments. On the contrary, the sound was not played under low-pressure situations. Quantitative results showed that increased cognitive anxiety, respiratory rate, bivariate variable error, and low self-confidence under high pressure. Qualitative results showed that high pressure was predominantly distracting. In another penalty kick-based study, Ferraresi and Gucciardi [33] collected penalty kick data, including scored or missed penalty kick information from the played football matches. They aimed to analyze social environment effects on individual performances. Data consist of 545 penalties from the France, Germany, Italy, Spain, and United Kingdom major leagues (from the season 2019-2020), and 148 of them were related to games played behind closed doors (295 of them awarded to home teams). In closed-door matches, the probability of missing a penalty increased, so the fans' support especially led to improved home teams' performance. The result from the analysis was that the fans affect individual performances. In another approach, the penalty kick result was estimated through the accelerometer sensor and camera data. Data were recorded from four bachelor students. They took 10-12 penalties on each part of the goal, which was divided into six parts. Thus, a total of 268 penalty kicks were taken. Camera footage was divided into four sections: running, preparing for the shot, hitting,

and post-hit. In the running phase, statistical calculations such as mean, variance, standard deviation, average amplitude, and average power were made from the data obtained from the accelerometer, and a better data set was created. 5-fold cross-validation was performed on the acquired data set. Random forest, decision tree (DT), support vector machines (SVM), and multiple linear perceptron algorithms were applied. SVM reached the highest accuracy among the algorithms at 47.98%. The accuracy reached 70.98% when convolutional neural networks were used [34]. Bloechle et al. [35] realized an augmented reality penalty simulator with a holographic goalkeeper to train sensorimotor kicking skills. The simulator was tested with 13 young elite soccer players. Using the simulator, the threshold time required to re-determine the direction of the kick according to the goalkeeper's movement before kicking the ball was reduced by 120 ms in ten training sessions of twenty kicks. In other words, the probability of successfully redirecting the kick to score the penalty was increased. The individual performance of each player was modeled with the Bayesian network. A 35% increase in the success rate was achieved with training and feedback. Based on the aforementioned studies reported in the literature, it can be said that the studies focused on topics such as analyzing the eye movements during penalty kick using eye tracking, in which area of the goal the probability of missing the penalty increases, the effect of stress caused by social environment during penalty kick, penalty kick outcome prediction through data recorded using camera and accelerometer, and the realization of a virtual reality simulator for penalty kick training. Although penalty kicks have been analyzed from various perspectives, there is no study that classifies the penalty kick outcome as a goal scored or missed using 16 features that have a high potential to affect the result by machine learning. In this paper, different from the previous studies, penalty kicks are analyzed from various perspectives, and 16 different features with high potential to affect the penalty kick outcome are extracted from match videos and some sports websites. These features are used together in penalty kick prediction by machine learning. This study aims to determine the combination of features that predict the penalty kick outcome with high accuracy among various features and thus contribute to the literature on penalty kick outcome prediction. In addition, this study is also important in the field of soccer academy as the penalty kick outcome can be improved positively by training on the features in the determined combination.

To determine the most important features, all possible feature subsets of the 16 features were tested one by one with different classification methods, including k -nearest neighbor (k -NN), DT, SVM, and linear discriminant analysis (LDA). To evaluate the performance of the classifiers, classification accuracy (CA), sensitivity (SE), specificity (SP), area under curve (AUC), Jaccard index (J), and F-measure (FM) metrics were obtained via polygon area metric (PAM) [36]. Thus, classifier performance can be evaluated with the PAM without needing various metrics. As a result of this paper, it is aimed to automatically determine the

outcome of a penalty kick by using machine learning algorithms.

In section 2, the data set description is introduced, classification and feature selection procedures are mathematically explained. Number of feature selection results for different classifiers are provided in figures, and various metrics results are provided in tables in section 3. section 4 presents the conclusion and discusses the findings.

2 Material and methods

2.1 Data set description

The data set consists of 170 penalties, 85 of which were scored and 85 of which were missed. All penalties were selected from the Turkish Super League, including the 2016-2017, 2018-2019, 2019-2020, 2020-2021, 2021-2022, and 2022-2023 seasons. Penalty kicks' and penalty-takers' information was taken from the Transfermarkt and Turkish Football Federation websites [37-38]. Analysis of penalty kicks were compiled with data from penalty positions for each season. As a result of the analysis of penalty kick videos, 16 attributes were determined as features. The features and their groups are shown in Table 1.

Penalty-taker's position, nationality, preferred foot, age, number of goals, success rate, game times, and match experience were obtained from Transfermarkt. Penalty-takers were divided into three different groups (defender, midfielder, and forward) according to their positions, three different groups (European, African, American) according to their nationalities, two different groups (right, left) according to their preferred foot while taking a penalty kick, four different groups ($1^{st}Group \leq 23$, $23 < 2^{nd}Group \leq 26$, $26 < 3^{rd}Group \leq 31$, $4^{th}Group > 31$) according to their ages. Penalty-taker and goalkeeper age difference feature was

obtained by subtracting the goalkeeper's age from the penalty-taker's age. This feature was divided into seven groups ($1^{st}Group < -9$, $-9 \leq 2^{nd}Group \leq -5$, $-5 < 3^{rd}Group < 0$, $4^{th}Group = 0$, $0 < 5^{th}Group < 5$, $5 \leq 6^{th}Group \leq 9$, $7^{th}Group > 9$) according to age difference. Penalty-taker's success rate, game times, and match experience were determined by looking at their career statistics.

League week, home/away status, league position of the penalty-taking team, penalty minute, match starting time, and match score before taking penalty kick information was obtained from the Turkish Football Federation official website. Due to the COVID pandemic, different numbers of clubs have competed in the Turkish Super League in the last years, so the number of league weeks has changed. The league week feature was obtained by dividing the number of week in which the penalty kick was taken by the total number of weeks of the season. The league position feature of the team that took the penalty kick was determined by the previous week's league table. This feature was set to zero for the first week's penalty kicks. Six groups were created for the penalty minute feature. These groups were determined by dividing 90 minutes into six equal parts ($0 < 1^{st}Group \leq 15$, $15 < 2^{nd}Group \leq 30$, $30 < 3^{rd}Group \leq 45$, $45 < 4^{th}Group \leq 60$, $60 < 5^{th}Group \leq 75$, $75 < 6^{th}Group \leq 90$). Additional times for both halves were grouped as the 45th and 90th minutes. Two different groups (before and after 6 pm) were created for the match starting time feature. Goal difference was used as the match score before taking the penalty kick feature. If the team that took a penalty kick was winning, the goal difference was set to plus goal difference. If it was losing, the goal difference was set to the minus goal difference. In the case of a draw, the goal difference was set to zero. Home/away status was determined on the team that took the penalty kick.

Table 1. Features and groups

Feature	Groups
Penalty-taker's position (F1)	1-Defence, 2-Midfielder, 3-Forward
Penalty-taker's nationality (F2)	1-European, 2-African, 3-American
League week (F3)	2022-2023 Season 38 weeks in total 2021-2022 Season 38 weeks in total 2020-2021 Season 42 weeks in total 2019-2020 Season 34 weeks in total 2018-2019 Season 34 weeks in total 2016-2017 Season 34 weeks in total
Home/Away Status (F4)	1-Home, 2-Away
League position of the penalty-taking team (F5)	Penalty-taking teams league position in the previous week
Penalty-taker's preferred foot (F6)	1-Right, 2-Left
Penalty minute (F7)	($0 < 1^{st}Group \leq 15$, $15 < 2^{nd}Group \leq 30$, $30 < 3^{rd}Group \leq 45$, $45 < 4^{th}Group \leq 60$, $60 < 5^{th}Group \leq 75$, $75 < 6^{th}Group \leq 90$)
Match starting time (F8)	1-Before 6 pm, 2-After 6 pm
Match score before taking penalty kick (F9)	Goal difference between the two teams 1-right lower, 2-right medium, 3-right upper, 4-center lower, 5-center medium, 6-center upper, 7-left lower, 8-left medium, 9-left upper
Potential target point of penalty kick (F10)	1stGroup ≤ 23 , 23 < 2ndGroup ≤ 26 , 26 < 3rdGroup ≤ 31 , 4thGroup > 31
Penalty-taker's age (F11)	1stGroup < -9, -9 \leq 2ndGroup \leq -5, -5 < 3rdGroup < 0, 4thGroup = 0, 0 < 5thGroup < 5, 5 \leq 6thGroup \leq 9, 7thGroup > 9
Penalty-taker and goalkeeper age difference (F12)	Total number of goals in the penalty-taker's career until the penalty
Number of goals scored by penalty-taker (F13)	Success rate on penalties in their career
Penalty-taker's success rate (F14)	Total minutes on the pitch in career
Penalty-taker's game times (F15)	Number of matches played in their career
Penalty-taker's match experience (F16)	

As shown in Figure 1, 9 different groups (according to the goalkeeper, 1-right lower, 2-right medium, 3-right upper, 4-center lower, 5-center medium, 6-center upper, 7-left lower, 8-left medium, 9-left upper) were determined for the potential target point feature. If the goalkeeper was able to catch the ball in the middle of the goal without moving left and right and without opening their arms to the sides, this point was defined as the center of the goal, if they moved to the right or left for catching the ball, the direction was defined as the goal's right or left, respectively. The section from the ground to the goalkeeper's knee was defined as lower, the section from the goalkeeper's knee to the middle of the goal (122 cm) was defined as medium, and the middle (122 cm) to upper (244 cm) part of the goal was defined as upper.

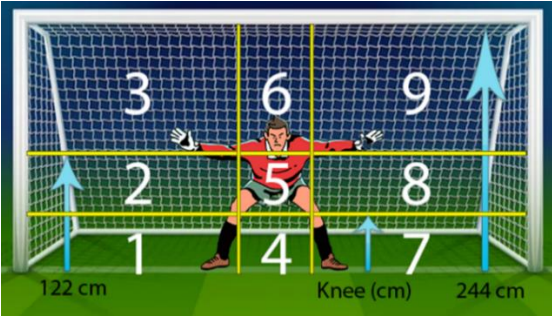


Figure 1. Potential target points of a penalty kick

The data set was randomly divided into training and test sets. The training data set consisted of a total of 120 data, 60 of which were goals, and 60 were missed. The test data set included a total of 50 data, 25 of which were goals, and 25 were missed. The test data set was used to evaluate the proposed method after the classifier model was trained with the training data set.

2.2 Classification and feature selection procedures

The k -NN is a simple and popular algorithm that classifies two or multi-class problems. The k -NN algorithm tries to find the nearest neighbors by calculating the distance between the test trial and all training trials. The class label of the test trial is defined by a majority vote on the k -NN. The Euclidean distance function is usually used to calculate the distance between two points.

SVM is a supervised algorithm used in classification and regression problems. This algorithm aims to separate the classes on a boundary line by finding a hyperplane in the feature space. We tried to minimize the classification error by increasing the distance between the hyperplane and the nearest data point from each class. Class determination can be calculated with the following equation:

$$C = \begin{cases} \text{Class 1 if } w^T \cdot i + d < 0 \\ \text{Class 2 if } w^T \cdot i + d \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

Where C is class information, i is the input vector, w is the weight vector, and d is the deviation.

The decision tree algorithm is also a supervised learning algorithm used in regression and classification problems. This algorithm is based on the top-down learning approach [39]. Each node of the decision tree is labeled with an input feature. This algorithm aims to obtain nodes that are easier to decide by applying a set of rules to the nodes.

LDA searches for a linear transformation by reducing the original data to much lower-dimensional space. In short, it aims to find the transform that maximizes class separability and the linear transform that provides the best separation of classes in reduced space [40]. The default settings of MATLAB were used for all classifiers.

Generally, CA, SE, SP, J, FM, and AUC are calculated to evaluate the performance of machine learning systems. The mathematical definitions are respectively given as follows:

$$CA = (TP + TN)/(TP + TN + FP + FN) \quad (2)$$

$$SE = TP/(TP + FN) \quad (3)$$

$$SP = TN/(TN + FP) \quad (4)$$

$$J = TP/(TP + FP + FN) \quad (5)$$

$$FM = 2TP/(2TP + FP + FN) \quad (6)$$

$$AUC = \left(\int_0^1 f(a) da \right) \quad (7)$$

TP, TN, FP, and FN are defined as the number of goal trials correctly predicted, the number of missed trials correctly predicted, the number of goal trials incorrectly predicted, and the number of missed trials incorrectly predicted, respectively. $f(a)$ is a receiver operating characteristic curve in which the TP rate (SE) is plotted as a function of the FP rate (1-SP) for different cut-off points.

PAM is calculated using the area of the polygon formed by the points CA, SE, SP, AUC, J, and FM in a regular hexagon. A polygon formed in a regular hexagon is shown in Figure 2.

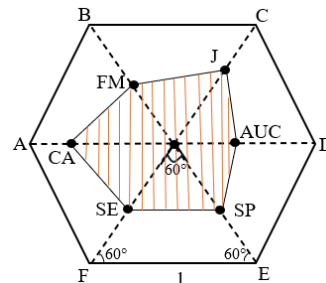


Figure 2. A Polygon created in a regular hexagon

It should be noted that the length (L) of each side of the regular hexagon is equal to 1, and it consists of six equilateral triangles. The Area of a regular hexagon is calculated from formula 8 as 2.59807.

$$\text{Area of a regular hexagon} = \frac{3\sqrt{3}}{2} \times L \quad (8)$$

The PAM is calculated using the following formula:

$$\text{PAM} = \text{PA}/2.59807 \quad (9)$$

The area of the polygon is PA. The PA is obtained by summing the areas of the six triangles formed. PA value is divided by 2.59807, and PAM is normalized to the [0,1] interval. Although it is a single value in PAM, it contains more information than the CA, SE, SP, AUC, J, and FM metrics whose formulas are given above. The polygon area is created using the values of the six metrics, and the PAM metric is obtained from the created area. In other words, the PAM value reflects the values of the six metrics, and obtaining a single metric from the six makes the comparison easier. In this paper, PAM was used to evaluate the performance of the four classifiers.

The CAs of 65536 possible subset combinations obtained from 16 features were calculated separately. It is worth mentioning that the subset combination providing the highest CA in 65536 possible subsets was considered. Due to the limited amount of data set and to verify the robustness of the method and to avoid randomization problems in the training and test sets, the classification result was run ten times through a random data selection. The highest CAs of each classifier in 10 runs were averaged, and the classifier with the highest average CA was determined. The features in the feature combination that provided the highest CA of the determined classifier were set as selected features. The average PAM, CA, SE, SP, J, FM, AUC, and their standard deviations (Stds) were calculated for each classification

model. In the calculation of stds, the data providing the highest CA in 10 runs of each classifier and other metrics obtained from these data were used. The most effective features were determined based on the selection frequencies of features in the combinations that provided the highest CAs. The effective features were used only for evaluation separately from the selected features. The flowchart of the proposed method is shown in Figure 3. All runs were performed in the MATLAB R2022a environment on a 2.2 GHz Intel Core i7 processor-powered computer with 16GB, 2933 MHz DDR4 memory. The CAs for all classifiers of possible subsets of 16 features in one run performed in approximately 30 hours.

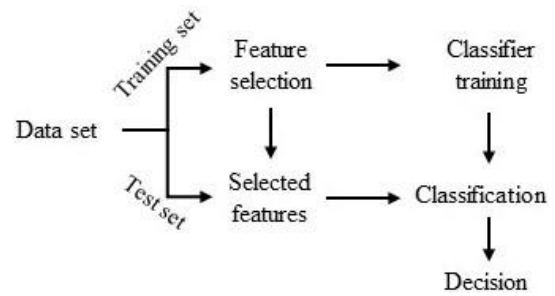


Figure 3. Flowchart of the proposed method

3 Results

In this paper, the outcome of a penalty kick was predicted with 16 features determined through penalty kick videos, penalty-takers' information, and match day information. Figure 4 shows the *k*-NN, DT, SVM, and LDA classifiers' feature selection frequencies of 10 runs in the training sets.

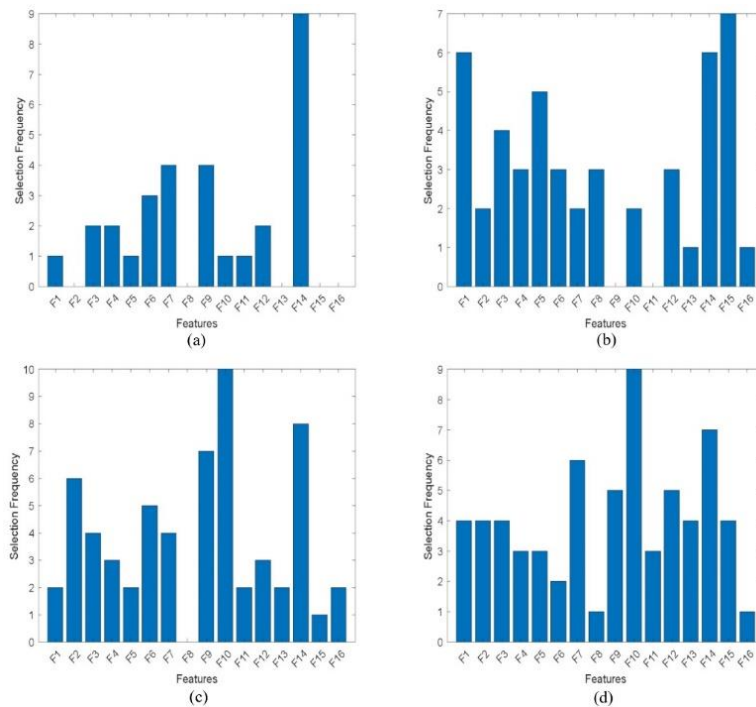


Figure 4. Selection frequencies of features (a) *k*-NN, (b) DT, (c) SVM, (d) LDA

The highest CAs of 10 runs of each classifier are shown in Table 2. According to these results, the 2nd run with 84% in *k*-NN, the 8th run with 82% in DT and SVM, and the 5th, 7th, 8th, and 10th runs with 78% in LDA provided the highest CAs. The highest CAs were achieved with the combinations of F1-F3-F4-F9-F10 in *k*-NN, F1-F6-F10-F14-F15 in DT, F1-F2-F6-F10-F11-F13-F14-F16 in SVM, and F1-F3-F5-F10-F11-F13-F14-F15, F3-F9-F10-F12-F13-F14-F16, and F7-F8-F10-F15 in LDA.

Table 2. The highest CAs of 10 runs

Run	<i>k</i> -NN CAs (%)	DT CAs (%)	SVM CAs (%)	LDA CAs (%)
1	80	76	76	76
2	84	78	74	72
3	82	70	72	70
4	80	76	76	76
5	78	76	76	78
6	80	76	76	76
7	78	74	76	78
8	80	82	82	78
9	78	78	72	72
10	78	76	76	78

The average PAM, CA, SE, SP, AUC, J, and FM values of each classifier and their stds were calculated. These results are given in Table 3. According to the results in Table 3, it is seen that the *k*-NN classification method provided the highest average CA and PAM values. A Small value of the std supports the robustness of the proposed algorithm. Therefore, the F1, F3, F4, F9, and F10 features in the combination that provided the highest CA of 84% in the *k*-NN classifier were determined as the selected features. The PAM and various metric results of the data using the *k*-NN classifier in 10 runs are shown in Table 4. In Table 3, and Table 4 all values except average CA, average SE, and average SP were normalized to the [0,1] interval, and average CA, average SE, and average SP values are given as percentages. Table 5 shows the confusion matrices of the run of each classifier that provided the highest CA. It can also be seen in the confusion matrix that the *k*-NN classifier provided balanced and high accuracy results in both classes.

Figure 4(a) shows that the feature with the highest frequency of selection in the *k*-NN classifier is the penalty taker's success rate corresponding to F14. This is also considered to be consistent. In addition, it is concluded that F7 and F9 features are also effective based on the selection frequencies. Figure 4(b), Figure 4(c), and Figure 4(d) show the effective features of DT, SVM and LDA. These effective features are F1, F14, F15 in DT, F9, F10, F14 in SVM and F7, F10, F14 in LDA.

Table 3. Average CA, PAM, SE, SP, AUC, J, FM results and stds

Classifier	<i>k</i> -NN	DT	SVM	LDA
Average CA ± std (%)	79.80 ± 1.99	76.20 ± 3.05	75.60 ± 2.80	75.40 ± 2.99
Average PAM ± std	0.60 ± 0.03	0.54 ± 0.04	0.52 ± 0.04	0.53 ± 0.05
Average SE ± std (%)	81.20 ± 6.27	73.20 ± 7.32	68.80 ± 4.13	72.80 ± 7.25
Average SP ± std (%)	78.40 ± 7.5	79.20 ± 8.80	82.40 ± 5.06	78.00 ± 7.83
Average AUC ± std	0.80 ± 0.02	0.76 ± 0.03	0.76 ± 0.03	0.75 ± 0.03
Average J ± std	0.67 ± 0.03	0.61 ± 0.04	0.59 ± 0.04	0.60 ± 0.04
Average FM ± std	0.80 ± 0.02	0.75 ± 0.03	0.74 ± 0.03	0.75 ± 0.03

Table 4. PAM and various metrics results of data using *k*-NN classifier in 10 runs

Run	PAM	CA(%)	SE(%)	SP(%)	AUC	J	FM
1	0.60	80.00	76.00	84.00	0.80	0.66	0.79
2	0.67	84.00	84.00	84.00	0.84	0.72	0.84
3	0.64	82.00	88.00	76.00	0.82	0.71	0.83
4	0.60	80.00	76.00	84.00	0.80	0.66	0.79
5	0.58	78.00	84.00	72.00	0.78	0.66	0.79
6	0.60	80.00	76.00	84.00	0.80	0.66	0.79
7	0.58	78.00	92.00	64.00	0.78	0.68	0.81
8	0.59	80.00	72.00	88.00	0.80	0.64	0.78
9	0.57	78.00	80.00	76.00	0.78	0.65	0.78
10	0.58	78.00	84.00	72.00	0.78	0.66	0.79

Table 5. Confusion matrices of the highest CAs

Classifier	Run	TP	FN	TN	FP
<i>k</i> -NN	2	21	4	21	4
DT	8	19	6	22	3
SVM	8	18	7	23	2
LDA	7 and 8	19	6	20	5
LDA	5 and 10	17	8	22	3

4 Conclusion and discussion

In this paper, the penalty kick outcome was predicted with 16 features, including statistical and match-day features. The proposed algorithm was tested using *k*-NN, DT, SVM, and LDA classifiers. We ran the proposed method 10 times to demonstrate the proposed algorithm's robustness and avoid random selection in testing and training sets. Average PAM values of *k*-NN, DT, SVM, and LDA classifiers were obtained as 0.60, 0.54, 0.52, and 0.53, respectively. We obtained significant results not only for PAM but also for other metrics by using the *k*-NN classifier. We calculated the average CA, SE, SP, AUC, J, and FM values as 79.80%, 81.20%, 78.40%, 0.80, 0.67, and 0.80, respectively. The PAM graph displays the results of six metrics on a single graph. It allows the results of six metrics to be compared and evaluated simultaneously. The PAM graph of the *k*-NN's 2nd run is shown in Figure 5.

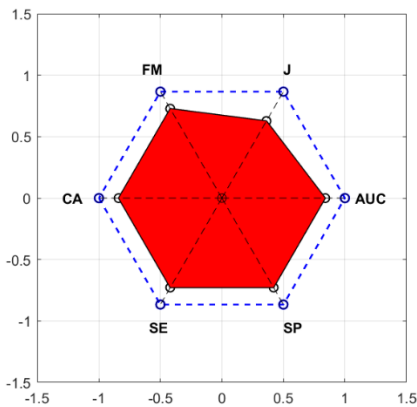


Figure 5. PAM graph

According to the results, it can be said that *k*-NN is the most suitable classifier for predicting the outcome of a penalty kick. In addition, small standard deviation values indicated the robustness of the system. The *k*-NN classifier selection frequencies results show that the most effective features were F7, F9, and F14. The selected features were F1, F3, F4, F9, and F10 which combination provided the highest CA in 10 runs.

The selected F3, F4, and F9 features are related to stress and pressure. Studies in the literature have also shown the effect of stress and pressure on penalty kicks [32,33]. Another feature selected by the study is the F10, which is related to the target point. In the literature, the penalty target point has also been proven to be effective [31]. The fact that the proposed method selects these features in the feature combination that provides the highest CA in predicting the penalty kick outcome can be considered as evidence that it works accurately and effectively.

In the most similar penalty prediction study in the literature, accelerometer sensor and camera data were obtained from 268 penalty kicks. The penalty kick outcomes were predicted with 70.98% CA using convolutional neural networks [34]. Different from the most similar study in the

literature, the conducted study analyzed penalty kicks by combining different features with each other without focusing only on a few features and achieved higher CA. This study contributed to the literature by determining the feature combination that predicts the penalty kick outcome with the highest CA.

In the proposed method, among the five features in the combination that predicts the outcome of the penalty kick with the highest CA, F3, F4, and F9 features are known before the penalty kick, and F1 and F10 features can be dynamically adjusted. By inputting data into the system, trained using five features determined with the proposed method, the success rate of the penalty kick can be calculated, and the ideal target point of the penalty kick and the most suitable penalty-taker can also be determined. This real-time penalty kick success determination system can be used in matches and training as it provides fast results.

Deep learning was not used in this paper because the data structure was not suitable. In future studies, performance will be increased with deep learning by adding data such as electromyography and eye tracking. In addition, it is aimed to improve the average PAM performance by adding not only the penalty-taker's related features but also the goalkeeper's related features.

Acknowledgements

Ural AKINCIOĞLU and Ahmet ÇİL was supported by a scholarship from The Scientific and Technological Research Council of Turkey.

Conflict of interest

The authors declare no potential conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 15%

References

- [1] J. A. Brown, A. Cuzzocrea, M. Kresta, K. D. Kristjanson, C. K. Leung and T. W. A. Tebinka, Machine learning tool for supporting advanced knowledge discovery from chess game data. 16th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA), 649-654, 2017. <https://doi.org/10.1109/ICMLA.2017.00-87>.
- [2] M. R. Albuquerque, P. H. C. Mesquita, T. Herrera-Valenzuela, D. Detanico and E. Franchini, Predicting taekwondo winners in high-level competition using ranking scores and country performance scores: an analysis of the 2019 World Taekwondo Championship. Ido Movement for Culture. Journal of Martial Arts Anthropology, 21(2), 2021. <https://doi.org/10.14589/ido.21.2.4>.
- [3] M. H. Zhong, J. C. Hung, Y. C. Yang and C. P. Huang, GA-SVM classifying method applied to dynamic evaluation of taekwondo. International Conference on Advanced Materials for Science and Engineering, 534-537, 2016. <https://doi.org/10.1109/ICAMSE.2016.7840191>.



- [4] B. Emad, O. Atef, Y. Shams, A. El-Kerdany, N. Shorim, A. Nabil and A. Atia, Ikarate: Improving karate kata. *Procedia Computer Science*, 170, 466-473, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.090>.
- [5] T. Chellatamilan, M. M. Ravichandran and K. Kamalakkannan, Modern Machine Learning Approach for Volleyball Winning Outcome prediction. *Global Journal of Multidisciplinary Studies*, 4(12), 63-71, 2015.
- [6] S. Wenninger, D. Link and M. Lames, Performance of machine learning models in application to beach volleyball data. *International Journal of Computer Science in Sport*, 19(1), 24-36, 2020. <https://doi.org/10.2478/ijcss-2020-0002>.
- [7] J. Van Haaren, H. B. Shitrit, J. Davis and P. Fua, Analyzing volleyball match data from the 2014 world championships using machine learning techniques. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 627-634, 2016. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939725>.
- [8] X. Dai and S. Li, Volleyball data analysis system and method based on machine learning. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 1-11, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/9943067>.
- [9] A.K. Holatka, H. Suwa and K. Yasumoto, Volleyball setting technique assessment using a single point sensor. *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, 567-572, 2019. <https://doi.org/10.1109/PERCOMW.2019.8730811>.
- [10] V. Y. Kulkarni and P. K. Sinha, Pruning of random forest classifiers: A survey and future directions. *International Conference on Data Science & Engineering (ICDSE)*, 64-68, 2012. <https://doi.org/10.1109/ICDSE.2012.6282329>.
- [11] T. Xu and L. Tang, Adoption of machine learning algorithm-based intelligent basketball training robot in athlete injury prevention. *Frontiers in Neurorobotics*, 14, 620378, 2021. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2020.620378>.
- [12] A. W. de Leeuw, S. V. der Zwaard, R. V. Baar and A. Knobbe, Personalized machine learning approach to injury monitoring in elite volleyball players. *European journal of sport science*, 22(4), 511-520, 2022. <https://doi.org/10.1080/17461391.2021.1887369>.
- [13] Z. Mahmood, A. Daud, R. A. Abbasi, Using machine learning techniques for rising star prediction in basketball. *Knowledge-Based Systems*, 211, 106506, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2020.106506>.
- [14] M. Migliorati, Detecting drivers of basketball successful games: an exploratory study with machine learning algorithms. *Electronic Journal of Applied Statistical Analysis*, 13(2), 454-473, 2020. <https://doi.org/10.1285/i20705948v13n2p454>.
- [15] S. W. Wang and W. W. Hsieh, Performance analysis of basketball referees by machine learning techniques. In *International Congress on Sport Sciences Research and Technology Support*, 2, 165-170, 2016.
- [16] R. Baboota and H. Kaur, Predictive analysis and modelling football results using machine learning approach for English Premier League. *International Journal of Forecasting*, 35(2), 741-755, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2018.01.003>.
- [17] A. Joseph, N. E. Fenton and M. Neil, Predicting football results using Bayesian nets and other machine learning techniques. *Knowledge-Based Systems*, 19(7), 544-553, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2006.04.011>.
- [18] F. Thabtah, L. Zhang and N. Abdelhamid, NBA game result prediction using feature analysis and machine learning. *Annals of Data Science*, 6(1), 103-116, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40745-018-00189-x>.
- [19] J.L. Oliver, F. Ayala, M. B. D. S. Croix, R. S. Lloyd, G. D. Myer and P. J. Read, Using machine learning to improve our understanding of injury risk and prediction in elite male youth football players. *Journal of science and medicine in sport*, 23(11), 1044-1048, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2020.04.021>.
- [20] Y. Liang, Sports Injury Prediction Model based on Machine Learning. *Economic Management and Big Data Application*, 969-981, 2024. https://doi.org/10.1142/9789811270277_0086.
- [21] M. Herold, F. Goes, S. Nopp, P. Bauer, C. Thompson and T. Meyer, Machine learning in men's professional football: Current applications and future directions for improving attacking play. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 14(6), 798-817, 2019. <https://doi.org/10.1177/1747954119879350>.
- [22] M. Frey, E. Murina, J. Rohrbach, M. Walser, P. Haas and M. Dettling, Machine learning for position detection in football. *6th Swiss Conference on Data Science (SDS)*, 111-112, 2019. <https://doi.org/10.1109/SDS.2019.00009>.
- [23] A. Garcia-Aliaga, M. Marquina, J. Coteron, A. R. Gonzales and S. L. Sanchez, In-game behaviour analysis of football players using machine learning techniques based on player statistics. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 16(1), 148-157, 2021. <https://doi.org/10.1177/1747954120959762>.
- [24] A. Mohandas, M. Ahsan and J. Haider, Tactically Maximize Game Advantage by Predicting Football Substitutions Using Machine Learning. *Big Data Cogn. Comput.*, 7, 117, 2023. DOI:10.3390/bdcc7020117.
- [25] I. Behravan and S. M. Razavi, A novel machine learning method for estimating football players' value in the transfer market. *Soft Computing*, 25(3), 2499-2511, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00500-020-05319-3>.
- [26] D. Abidin, A case study on player selection and team formation in football with machine learning. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 29(3), 1672-169, 2021. <https://doi.org/10.3906/elk-2005-27>.
- [27] J. Almulla and T. Alam, Machine learning models reveal key performance metrics of football players to win matches in qatar stars league. *IEEE Access*, 8,

- 213695-213705, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3038601>.
- [28] S. Kampakis, Comparison of Machine Learning Methods for Predicting the Recovery Time of Professional Football Players After an Undiagnosed Injury. *MLSA@ PKDD/ECML*. 1969, 58-68, 2013.
- [29] S. Chawla, J. Estephan, J. Gudmundsson and M. Horton, Classification of passes in football matches using spatiotemporal data. *ACM Transactions on Spatial Algorithms and Systems (TSAS)*. 3(2), 1-30, 2017. <https://doi.org/10.1145/3105576>.
- [30] S. Terekli and H. O. Çobanoğlu, Developing economic values in football: Example of Turkish Football Federation. *Open Access Library Journal*, 5(2), 1-14, 2018. <https://doi.org/10.4236/oalib.1104263>.
- [31] M. A. Timmis, A. Piras and K. N. Van Paridon, Keep your eye on the ball; the impact of an anticipatory fixation during successful and unsuccessful soccer penalty kicks. *Frontiers in psychology*, 9, 2058, 2018. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02058>.
- [32] L. Ellis and P. Ward, The effect of a high-pressure protocol on penalty shooting performance, psychological, and psychophysiological response in professional football: A mixed methods study. *Journal of Sports Sciences*, 40(1), 3-15, 2022. <https://doi.org/10.1080/02640414.2021.1957344>.
- [33] M. Ferraresi and G. Gucciardi, Who chokes on a penalty kick? Social environment and individual performance during Covid-19 times. *Economics Letters*, 203, 109868, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.econlet.2021.109868>.
- [34] A. Chakma, A. Z. M. Faridee, N. Roy and H. S. Hossain, Shoot like ronaldo: Predict soccer penalty outcome with wearables. *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, 1-6, 2020. <https://doi.org/10.1109/PerComWorkshops48775.2020.9156244>.
- [35] J. L. Bloeché, J. Audiffren, T. Le Naour, A. Alli, D. Simoni, G. Wüthrich and J. P. Bresciani, It's not all in your feet: Improving penalty kick performance with human-avatar interaction and machine learning. *The Innovation*, 5(2), 100584, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2024.100584>.
- [36] O. Aydemir, A new performance evaluation metric for classifiers: polygon area metric. *Journal of Classification*, 38, 16-26, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00357-020-09362-5>.
- [37] Transfermarkt, Football player and match statistics, <https://www.transfermarkt.com/>, Accessed 16 May 2024.
- [38] Turkish football federation official website, Match statistics, <https://www.tff.org/>, Accessed 16 May 2024.
- [39] B. R. Patel and K. K. Rana, A survey on decision tree algorithm for classification. *International Journal of Engineering Development and Research*, 2(1), 1-5, 2014.
- [40] C. H. Park and H. Park, A comparison of generalized linear discriminant analysis algorithms. *Pattern Recognition*, 41(3). 1083-1097, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2007.07.022>.





Kayacı oluşturan bileşenlerin Leeb sertliğine etkisi The effect of rock components on Leeb hardness

Mehmet Can Balcı^{1,*} , İsmail İnce² 

¹ Batman Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 72000, Batman, Türkiye

² Konya Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 42250, Konya, Türkiye

Öz

Bu çalışmanın amacı, kayaların tek eksenli sıkışma dayanımını dolaylı, tahribatsız, ucuz ve pratik bir şekilde tahmin etmek için son dönemde yaygın olarak kullanılan Leeb sertliğine (HL), örnek içindeki farklı bileşenlerin etkisini araştırmaktır. Bu amaçla, bileşiminde egemen olarak volkanik cam (VC) ve volkanik kayaç parçaları (VKP) içeren piroklastik kayaçtan küp şekilli örnekler hazırlanmıştır. Görüntü işleme programı (Image Pro Plus 6.0) vasıtasıyla küp örneklerin her bir yüzeyindeki volkanik kayaç parçası yüzdeleri (VKPY) belirlenmiştir. Ayrıca küp örneklerin her bir yüzeyinin HL değeri belirlenmiştir. VKPY değişimi ile HL değeri arasındaki ilişki basit regresyon analizi ile araştırılmış ve bu değerler arasında güçlü belirleme katsayıları bulunmuştur. Elde edilen bu ilişkilere göre, HL değerinin kayaç bileşiminde yer alan VKP'dan etkilendiği tespit edilmiştir. HL testinin bu tür kayaçlar için uygun olmadığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Leeb sertliği (HL), Görüntü işleme programı, Volkanik kayaç parçası (VKP), Piroklastik kayaç

1 Giriş

Leeb sertliği (HL), İsviçreli mühendis Dietmar Leeb tarafından 1975 yılında metaller ve polimerlerin sertliği belirlemek için geliştirilen tahribatsız bir testtir [1]. Bu testin taşınabilir olması ve test cihazının uygulanan darbe yönünü seçme olanağı sunması, cihazın farklı disiplinler (jeomorfoloji, inşaat mühendisliği, restorasyon çalışmaları ve kaya mekaniği) tarafından kullanılmasını yaygınlaştırmıştır [2-7]. Leeb sertliği ile ilgili kaya mekaniğindeki öncü çalışmalar, kayaların HL değerleri ile fiziksel ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkilerin irdelenmesi yönünde olmuştur [8-15]. Bu çalışmalarda en çok yoğunlaşılan alan, kayaların tek eksenli sıkışma dayanımının tahminidir. Bu değer tahmininde araştırmacılar basit regresyon [1, 8, 11-17], çoklu regresyon [9, 14], yapay sinir ağları [10] ve fuzzy [9] gibi yaklaşımları değerlendirmişlerdir. Bu çalışmalarda geliştirilen tahmin modellerinde yüksek korelasyon ilişkileri belirlenmiştir. Bazı araştırmacılar ise kayalarda yapılan HL testlerinin boyut faktörü [1, 8, 12, 13, 17-19], gözenek [20-22], tane veya kristal boyutundan [1] doğrudan etkilendiğini belirtmişlerdir. Kayaların HL değerine boyut faktörü

Abstract

The scope of this study is to investigate the effect of different components in the sample on Leeb hardness (HL), which has recently been widely used to predict the uniaxial compressive strength of rocks in an indirect, non-destructive, cost-effective, and practical way. For this purpose, cube-shaped samples were prepared from pyroclastic rocks consisting for the most part of volcanic glass (VG) and volcanic rock fragments (VRF). The percentage of volcanic rock fragments (VRFP) on each surface of the cube samples was determined using an image processing program (Image Pro Plus 6.0). Moreover, the HL value of each surface of the cube samples was determined. The correlation between the change in VRFP and HL value was investigated by simple regression analysis and strong coefficients of determination were found between these values. According to these correlations, it was determined that the HL value is affected by the VRF in the rock composition. As consequence, the HL test was found to be unsuitable for these types of rock.

Keywords: Leeb hardness (HL), Image processing program, Volcanic rock fragment (VRF), Pyroclastic rock

etkisini ortadan kaldırmak adına küp ve karot örnekler için gerekli örneklem boyut özellikleri tanımlanmıştır. İnce ve Bozdağ [1] küp örnekler için bir kenar uzunluğunun en az 7 cm olması gerektiğini belirtmişlerdir. Çelik vd. [19]'ne göre karot örneklerde yapılacak eksenel ve çapsal ölçümler için boy/çap oranı $\geq 1,5$ olmalıdır. Birçok araştırmacı kayaların porozitesinin artışı ile HL değerinde düşüş gözlemlendiğini belirtmişlerdir [1, 20, 22]. Ayrıca Çelik ve Çobanoğlu [22] çalışmalarında örnek yüzeyindeki gözeneklerin varlığının artışının Leeb sertlik cihazının çalışmasını etkilediğini ve HL değerlerinin ölçümlerinin alınmasının zorlaştırdığını belirtmişlerdir. İnce ve Bozdağ [1] kayaların içindeki iri tane veya iri kristallerin HL değerinde büyük sapmalar oluşturduğunu tespit etmişlerdir. Bütün bu çalışmalara rağmen bu konuda detaylı çalışmaların yeterince olmadığını söylemek mümkündür. Kayaların HL değeri üzerine iri taneli kayaç parçalarının etkisini tespit etmek, kayalar için geliştirilecek HL standartlarının uygunluğunun ve kullanılabilirliğinin sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada anglomera örneklerinden farklı tane boyutlarında volkanik kayaç parçaları içeren küp örnekler hazırlanarak bu küp örneklerin yüzeylerindeki

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mehmetcan.balci@batman.edu.tr (M. C. Balcı)

Geliş / Received: 26.07.2024 Kabul / Accepted: 20.08.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

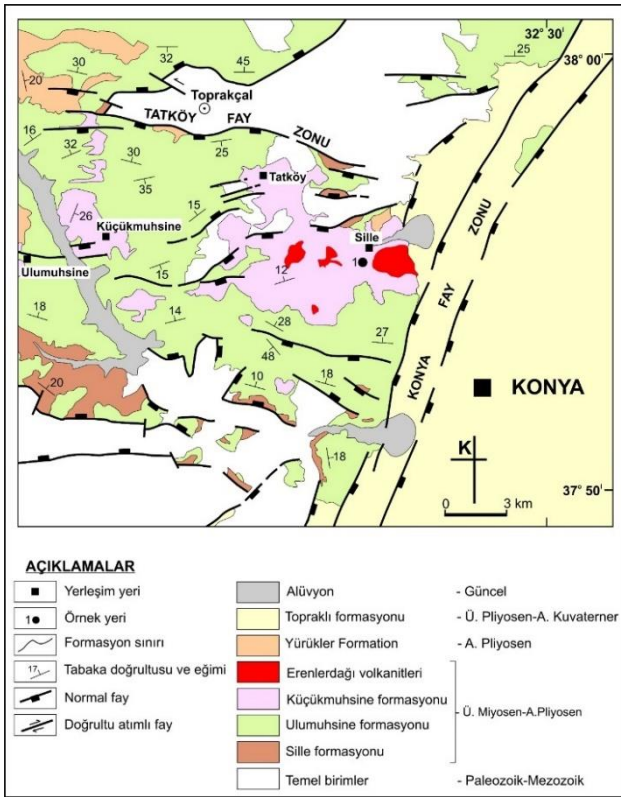
doi: 10.28948/ngumuh.1523160

farklı tanelerin oranlarının artışı ile HL değerindeki değişim araştırılmıştır.

2 Materyal ve metot

2.1 Materyal

Çalışmada kullanılan örneklerin derlendiği alanın temelini Paleozoik ve Mezozoik yaşlı birimler oluşturmaktadır (Şekil 1). Bu birimler üzerine, açılal uyumsuzlukla kırmızı, kahverengi çamurtaş ve kumtaşı konglomeralarından oluşan Geç Miyosen-Erken Pliyosen yaşlı Sille formasyonu gelmektedir [23]. Sille formasyonu üzerinde yanal düşey geçişle Ulumuhsine formasyonu yer almaktadır. Ulumuhsine formasyonu, kirli beyaz, krem, gri, bej ve sarı renkli, ince-kalın tabakalı gösel kireçtaşları ve kırıntılılardan oluşmaktadır [24].

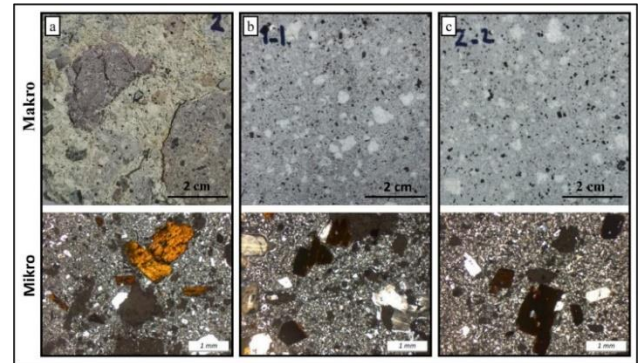


Şekil 1. Örneklerin derlendiği bölgenin jeoloji haritası (Aksoy ve Demiröz [25] ve Aksoy [26]’dan değiştirilerek alınmıştır)

Birimin yaşı Geç Miyosen-Erken Pliyosen'dir [23]. Ulumuhsine formasyonu üzerine yanal düşey geçişli olarak Küçükmuhsine formasyonu yer alır. Bu birim, beyaz, gri ve bazı yerlerde pembe renkli piroklastiklerden (tüf, tüfit, anglomera ve volkanik breş) oluşan ve volkanik kumtaşı ile aralanmalı volkano-sedimanter bir istif olup Geç Miyosen-Erken Pliyosen yaşlıdır [23]. Bu birimler, dasit, andezit ve bazaltik kayalardan oluşan Geç Miyosen-Erken Pliyosen yaşlı Erenler Dağı volkanitleri tarafından kesilir. Erenler Dağı volkanitleri, alüvyon yelpazesi ve örgülü akarsu birikintilerinden oluşan Erken Pliyosen yaşlı Yörükler formasyonunun açılal uyumsuzluğu ile örtülür [23]. Yörükler formasyonu üzerine alüvyon yelpazesi

birikintilerinden oluşan Geç Pliyosen-Erken Kuvaterner yaşlı Topraklı formasyonu uyumsuzlukla gelir.

Bu çalışmada Konya bölgesinde yaygın olarak gözlenen Küçükmuhsine formasyonu içerisinde yer alan anglomera seviyelerinden alınan örnekler kullanılmıştır. Kayacı oluşturan bileşenlerin makro ve mikro resimleri Şekil 2’de verilmiştir. Numune gri renkli hamur fazının (VC) içerisinde feno kristaller (FK) ve farklı volkanik kayaç parçaları (VKP) içermektedir (Şekil 2a). Kayacın hamuru yer yer kül boyutu çoğunlukla lapilli boyutundaki tanelerden oluşmaktadır. Ayrıca bu birim içerisinde blok boyutunda volkanik kayaç parçaları yer almaktadır. Örneğin ince kesitlerinde başlıca bileşenini volkanik cam, plajiyoklaz, biyotit, kayaç parçası, kuvars ve opak mineral oluşturmaktadır (Şekil 2a ve Tablo 1). Örneği oluşturan hamur fazı ve farklı volkanik kayaç parçalarının mineralojik bileşimleri ve dokusal özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Şekil 2a’daki anglomera örneğinin (1 nolu örnek) makro görünümü incelendiğinde kayacın hamur fazı ve farklı renkteki volkanik kayaç (VK1 ve VK2) parçalarından oluştuğu görülmektedir. Arazide Küçükmuhsine formasyonu içerisinde 1 nolu örneği oluşturan VK1 ve VK2 kayaç parçalarına benzer doku özelliklerindeki volkanik kayaç blok örnekleri (V1 ve V2) derlenmiştir. Burada V1 nolu örnek VK1, V2 nolu örnek ise VK2 ile benzer mineralojik ve dokusal özellikler sahiptir. Bu örneklerin makro ve mikro görünüşleri Şekil 2b, ve c’de verilmiştir. Her iki kayaç parçası renkleri farklı olmasına rağmen benzer mineralojik bileşim ve dokuya sahiptir. Streickeisen [27] sınıflandırmasına göre V1 ve V2 örnekleri dasit olarak adlandırılmıştır. Bütün örneklerin hamur fazı ikincil olarak silisleşmiştir.



Şekil 2. Kayaçların makro ve mikro görünümü, (a) Anglomera, (b) VK1, (c) VK2

2.2 Metot

Piroklastik kaya ve içinde yer alan volkanik kayaç bloklarının mineralojik-petrografik ve fiziksel özellikleri ile Leeb sertliği değerlerinin belirlenmesi amacıyla blok örnek derlemesi yapılmıştır. Daha sonra derlenen blok örneklerden TS EN-1936 [28]’da önerilen standarda göre her bir kayaç grubu için 7 cm x 7 cm x 7 cm ölçülerinde 5 adet küp örnek hazırlanmıştır. Hazırlanan küp örnekleri kullanılarak kayacın fiziksel özellikleri (kuru yoğunluk ve porozite) TS EN-1936 [28]’da önerilen yöntemle belirlenmiştir. P-dalgı hızı (Vp) değerleri ise ASTM E494-10 [29]’da belirtilen standartlar dikkate alınarak tespit edilmiştir. Bu

deney Pundit marka PL-200 model cihaz kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3a). Her bir örnekte ölçüm üç kez tekrarlanmıştır. Daha sonra bu değerlerin ortalaması alınarak örneğin Vp değeri belirlenmiştir. Her bir kayaç grubunun fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde 5 adet küp örnek kullanılmıştır.

Tablo 1. Piroklastik kayaçların dokusal özellikleri ve mineralojik bileşimleri

	Kayaçın Bileşenleri	Renk	Makro Özellikler
1	VC, VKP ve FK	Açık gri	İnce-orta taneli, afanitik porfirik dokulu
V1	VC ve FK	Lila	Afanitik porfirik dokulu
V2	VC ve FK	Gri	Afanitik porfirik dokulu
Mikro Özellikler			
Örnek No	Bileşenlerin % dağılımı	Doku	
1	Shf:86, Pl:5, By:3, Q:2, Kp:3, Op:1	Porfirik	
V1	Shf:48, Pl:25, By:17, Q:10, Op:1	Vitrofirik porfirik	
V2	Shf:48, Pl:24, By:15, Q:12, Op:1	Vitrofirik porfirik	

VC: Volkanik cam, VKP: Volkanik kayaç parçası, FK: Feno kristaller, Pl: Plajzioklaz, Kp: Kayaç parçası, Q: Kuvars, By: Biyotit, Op: Opak mineral, Shf: Silisleşmiş hamur fazı

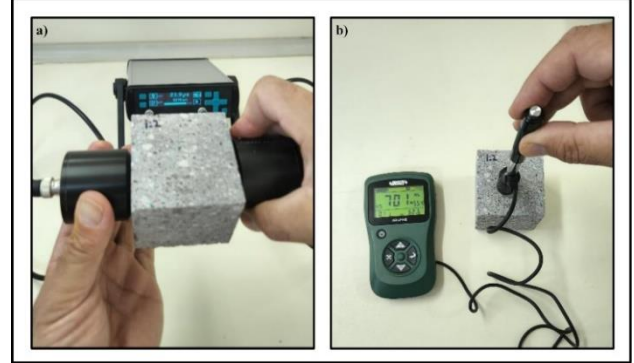
Leeb sertliği, test edilen malzemenin hem plastik hem de elastik özelliklerine bağlı olan dinamik veya geri tepme tipi yüzey sertliğinin ifadesidir [30]. Leeb sertliği, yay kuvvetinin ürettiği enerjinin küresel şekilli bir tungsten uca aktarılması ve ucun test ölçüm yüzeyinde sabit bir hızda darbe ve geri tepme enerjileri arasındaki oranın 1000 katının alınmasıyla hesaplanır. Leeb sertlik testinin çelik ürünler için geliştirilmiş bir standardı [30] olmasına rağmen, kayalar için standart olarak esas alınan bir test yoktur. Bu çalışmada Leeb sertlik ölçümleri Insize marka test cihazı ile darbe enerjili (11 Nmm) D-probe kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3b). Cihazın ölçüm aralığı 0 ile 999 HL arasında değişmekle birlikte doğruluk değeri ± 6 HL'dir. Ölçümden önce cihaz kalibre edilmiştir. Kayaçların (anglomera, V1 ve V2) HL değerinin belirlenmesinde İnce ve Bozdağ'ın [1] önerdikleri yaklaşım dikkate alınarak örneğin yüzeyinde 20 farklı noktada ölçülen değerlerin ortalaması olarak yapılmıştır (Şekil 3b).

Anglomera örneğinin yüzeyindeki VKP miktarının HL değerine etkisi araştırılırken küp numunelerin her bir yüzeyi için HL değeri belirlenmiştir. Her bir yüzeyin HL değeri belirlenirken yüzeyde rasgele 20 farklı noktada ölçüm yapılmıştır. Bu ölçümlerin ortalaması alınarak yüzeye ait HL değerleri belirlenmiştir. Bu aşamada toplam 30 yüzeyde (5 küp örnek x 6 yüzey) ölçüm yapılmıştır.

Numunelerin yüzeyindeki volkanik kayaçların oranını belirlemek için her bir örneğin 6 yüzeyinde HL testinin ardından yüksek çözünürlüklü görüntüleri elde edilmiştir. Görüntülerin elde edilmesinde Canon EOS 450 (12 megapiksel) fotoğraf makinası kullanılmıştır. Daha sonra her bir yüzeydeki 5 mm'den büyük olan volkanik kayaç parçasının toplam yüzeydeki oranları belirlenmiştir. Bu amaç için Image Pro Plus 6.0 paket programı kullanılmıştır.

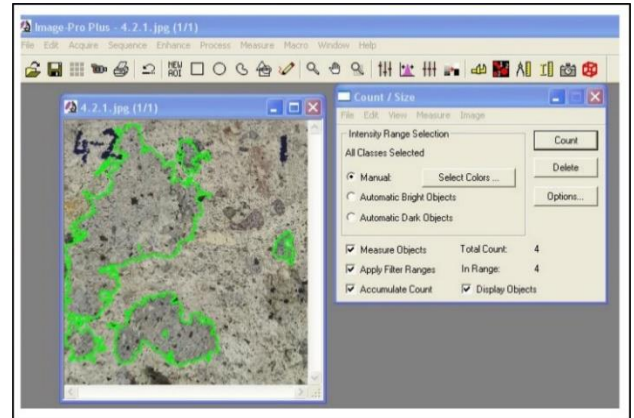
Bu paket programda volkanik kayaç parçalarına ait alanlar uygun "Range" ve "Smooth" değerleri seçilerek

manuel olarak belirlenmiştir (Şekil 4). Bu süreç her bir kayaç parçasının manuel olarak ölçülmesine yardımcı olmuştur. İnceleme alanı üzerindeki volkanik kayaç parçalarının dağılımını daha iyi görebilmek için görüntüleri maskeleyme işlemi uygulanmıştır. En son aşamada ise her bir yüzeyde volkanik kayaç parçalarının sınırladığı alanlar belirlenmiştir.



Şekil 3. Kayaçlarda bazı fiziksel özelliklerin ölçümü: (a) P-dalga hızı, (b) Leeb sertliği

Çalışmada kullanılan kayaçların petrografik özellikleri TS EN-12407 [31]'de önerilen yöntemle ince kesitler hazırlanarak Leica marka DM 2700 P model polarize mikroskop kullanılarak incelenmiştir.



Şekil 4. Örneklerin yüzeydeki VKP seçim aşamasından bir görünüm

3 Bulgular ve tartışma

Çalışmada kullanılan piroklastik kayacın ve bu kayacın bileşenlerinden VKP'yi temsil eden volkanik bloklara ait kayaçlardan elde edilen fiziksel özellikler (gözeneklilik, kuru yoğunluk, P dalga hızı) ve Leeb sertliğine (HL) ait istatistik değerler (minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma) Tablo 2'de verilmiştir. 1 nolu kayacın fiziksel özellikleri için istatistik değerler incelendiğinde, standart sapma değerinin yüksek olduğu görülmektedir. Bu örneğin minimum HL değeri 201.00 iken maksimum HL değeri 709.00 olarak belirlenmiştir. 1 nolu örneğin HL değeri için standart sapma değeri (183.77) oldukça yüksek olarak belirlenmiştir. V1 örneğinin kuru yoğunluğu, porozitesi ve P-dalga hızı ortalama değerleri sırasıyla 2.24 gr/cm^3 , % 10.56 ve 3.15 km/s 'dir. V2 nolu örneğin kuru yoğunluğu 2.33

gr/cm³, porozitesi %8.76 ve P-dalga hızı 3,18 km/s'dir. V1 ve V2 nolu örneğin HL değerleri ise sırasıyla 620.67 ve 711.45'dir. Volkanik kayaların HL değerlerinin yüksek olmasına rağmen standart sapma değeri (V1:24.79; V2:22.94) oldukça küçüktür.

Tablo 2. Kayaların fiziksel özellikleri ve HL değerleri

Kayaç	Örnek Sayısı	İstatiksel Tanımlama	ρ_d g/cm ³	n %	Vp km/s	HL
1*	5	Ortalama	1.61	19.52	1.48	509.67
		Minimum	1.61	24.68	1.43	201.00
		Maksimum	1.77	28.78	1.54	709.00
		Standart sapma	0.09	4.71	0.06	183.77
		Ortalama	2.24	10.56	3.15	620.67
VK1	5	Minimum	2.23	10.54	3.14	586.00
		Maksimum	2.26	10.57	3.16	666.00
		Standart sapma	0.01	0.02	0.01	24.79
		Ortalama	2.33	8.76	3.18	711.45
		Minimum	2.32	8.72	3.17	675.00
VK2	5	Maksimum	2.33	8.80	3.19	740.00
		Standart sapma	0.01	0.04	0.01	22.94

ρ_d : kuru yoğunluk, n: porozite, Vp: P-dalga hızı, HL: Leeb sertliği
* 1 nolu kayaya HL testi yapılırken bileşenlere dikkat edilmeden her bir örnekte rasgele 20 ölçüm yapılarak elde edilen değerlerin ortalamasıdır.

Piroklastik kayacın HL değerlerindeki farklılığın ana sebebi, kayacı oluşturan bileşenlerden VC ve VKP'larıyla ilişkilidir. Bu ilişkinin daha iyi anlaşılması için örneklerin her bir yüzeyinde kayacı oluşturan bileşenlerin HL değerleri ayrı ayrı belirlenmiştir (Tablo 3). Kayacın bileşenlerinde VC'nin HL değeri 119 ile 387 arasında değişmekte olup ortalama değer 274.95 olarak belirlenmiştir. VKP1 için HL değeri 351 ile 663 arasındayken VKP2 için 334 ile 709 arasında tespit edilmiştir. VKP'ların HL değeri, volkanik kayalardan (VK1 ve VK2) elde edilen HL değerlerinin minimum, maksimum aralığından daha geniş bir aralıkta ve standart sapma değerlerinin daha yüksek olması boyut faktörü ile açıklanabilir. Daha önce birçok araştırmacının belirttiği üzere HL testi örneklem boyutundan doğrudan etkilenmektedir [1, 21, 22]. Bu durum örneklerin içinde yer alan VKP farklı boyutlarda olması ile ilişkilidir. Örnek içinde daha büyük VKP'larında daha yüksek HL değerleri belirlenirken daha küçük VKP'da daha küçük değerler ölçülmüştür. Bu değişimler 1 nolu kayacın HL değerindeki değişimle doğrudan ilişkilidir. Bu durumun daha iyi anlaşılması için Image Pro Plus 6.0 görüntü işleme programı aracılığıyla örnek yüzeylerinde kayacın bileşenlerinin değişimleri belirlenerek Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4 incelendiğinde küp örneklerin yüzeyinde volkanik kayacın parçalarının (VK1 ve VK2) yüzde dağılımı yaklaşık olarak %2 ile %71 arasında değişmektedir. Örnek yüzeyindeki volkanik kayacın yüzdeleri (VKPY) ile HL değerleri arasındaki ilişki Şekil 5'de gösterilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde HL ile VKPY arasında artan doğrusal bir ilişki tespit edilmiştir. HL ile VKPY arasındaki belirleme katsayı (R^2) ise 0.906'dır. HL değeri ölçüm yüzeyinde

VKPY artışıyla doğru orantılı olarak artmaktadır. HL ile VKPY arasındaki ilişkinin geçerliği varyans analizi ile denetlenmiş ve %5 önem düzeyi ($p < 0.05$) için kabul edilebilir olduğu belirlenmiştir (Tablo 5).

Tablo 3. Piroklastik kayacın farklı bileşenlerinde (VC ve VKP) ölçülen HL değerlerinin istatistiksel özellikleri

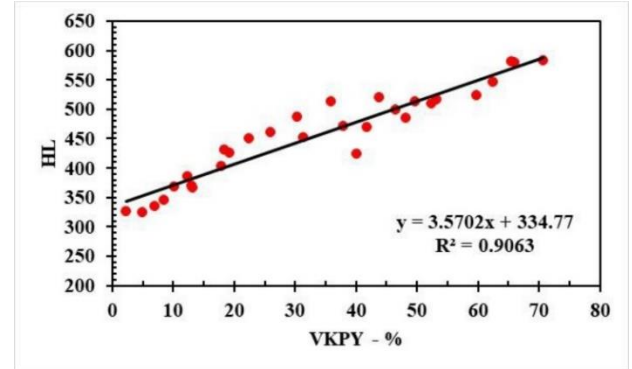
Kayaç Bileşenleri	İstatiksel Tanımlama			
	Ortalama	Minimum	Maksimum	Standart sapma
VC	274.95	119.00	387.00	76.83
VKP1	511.09	351.00	663.00	66.16
VKP2	555.81	334.00	709.00	76.83

Tablo 4. Küp örnek yüzeylerinde kayacın parçalarının yüzdesel değerlerinin istatistiksel özellikleri

Kayaç Parçaları	İstatiksel tanımlama			
	Ortalama	Minimum	Maksimum	Standart sapma
VKP1	16.32	0.00	49.49	18.82
VKP2	17.40	2.23	38.83	9.22
Σ VKP	33.72	2.23	70.69	23.18

Tablo 5. HL ile VKPY arasındaki ilişkinin varyans analizi

R^2	t test	F test	$p < 0.05$
0.9063	16.458	270.880	0.000



Şekil 5. VKPY ile HL arasındaki istatistiksel ilişki

HL değerinin kayacı oluşturan bileşenlerden etkilendiği daha önce birçok araştırmacının [1, 19, 20] sadece belirttiği ve araştırılmasını önerdiği durum olup yapılan çalışmayla bu deneysel olarak ispatlanmıştır. HL deneyinin farklı boyutlarda ve sertliklerde bileşenlerden oluşan kayalar için kullanılması önerilmez.

4 Sonuçlar

Konya bölgesinden alınan anglomera kayacın örneğini oluşturan bileşenlerin HL değerine etkisinin belirlenmesi amacı ile yapılan bu araştırmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Piroklastik kayacı oluşturan bileşenler (VC ve VKP) HL değerini doğrudan etkilemektedir.
- Örnekler içindeki bileşenlerin (VKP) boyutları HL değerini etkileyen diğer bir faktördür.
- Örneklem yüzeyinde VKPY ile HL arasında doğrusal bir ilişki olup R^2 değeri ise 0,906 olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmadan elde edilen bulgular HL deneyinin farklı bileşenlerden oluşan kayalar için uygun olmadığını ortaya koymuştur.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

- [1] İ. İnce and A. Bozdağ, An investigation on sample size in Leeb hardness test and prediction of some index properties of magmatic rocks. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 1-13, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06478-9>.
- [2] S. Kawasaki, C. Tanimoto, K. Koizumi and M. Ishikawa, An attempt to estimate mechanical properties of rocks using the Equotip hardness tester. *Journal of the Japan Society of Engineering Geology*, 43(4), 244–248, 2002. <https://doi.org/10.5110/jjseg.43.244>.
- [3] S. Wakasa, H. Matsuzaki, Y. Tanaka and Y. Matsukura, Estimation of episodic exfoliation rates of rock sheets on a granite dome in Korea from cosmogenic nuclide analysis. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 31(10), 1246–1256, 2006. <https://doi.org/10.1002/esp.1328>.
- [4] L. Mol and H. A. Viles, The role of rock surface hardness and internal moisture in tafoni development in sandstone. *Earth Surf Processes Landforms*, 37(3), 301–314, 2012. <https://doi.org/10.1002/esp.2252>.
- [5] K. Wilhelm, H. Viles, O. Burke and J. Mayaud, Surface hardness as a proxy for weathering behaviour of limestone heritage: a case study on dated headstones on the Isle of Portland, UK. *Environmental Earth Sciences*, 75, 931, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5661-y>.
- [6] Y. Wang, Q. Pei, S. Yang, Q. Guo and H. Viles. Evaluating the condition of sandstone rock-hewn cave-temple façade using in situ non-invasive techniques. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53, 2915-2920, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02063-w>.
- [7] K. Gireson, S. B. Çelik and İ. Çobanoğlu, Non-destructive estimation of uniaxial compressive strength of deteriorated carbonate building stones by frost action. *Environmental Earth Sciences*, 82(14), 363, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11032-9>.
- [8] W. Verwaal and A. Mulder, Estimating rock strength with the Equotip hardness tester. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 30(6), 659-662, 1993.
- [9] M. Alvarez Grima and R. Babuška, Fuzzy model for the prediction of unconfined compressive strength of rock samples. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(3), 339–349, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(99\)00007-8](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(99)00007-8).
- [10] F. Meulenkamp and M. A. Grima, Application of neural networks for the prediction of the unconfined compressive strength (UCS) from Equotip hardness. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(1), 29–39, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(98\)00173-9](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(98)00173-9).
- [11] H. Aoki and Y. Matsukura, Estimating the unconfined compressive strength of intact rocks from equotip hardness. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67, 23–29, 2008. <https://doi.org/10.1007/s10064-007-0116-z>.
- [12] Y. Asiri, A. Corkum and H. El Naggar, Leeb hardness test for UCS estimation of sandstone. 69th Geo Vancouver Conference, Vancouver, Canada, October 2016.
- [13] A.G. Corkum, Y. Asiri, H. El Naggar and D. Kinakin, The Leeb hardness test for rock: an updated methodology and UCS correlation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51, 665-675, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1372-2>.
- [14] S. B. Çelik and İ. Çobanoğlu, Comparative investigation of Shore, Schmidt, and Leeb hardness tests in the characterization of rock materials. *Environmental Earth Sciences*, 78, 1-16, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8567-7>.
- [15] N. Yılmaz Güneş and R. M. Goktan, Comparison and combination of two NDT methods with implications for compressive strength evaluation of selected masonry and building stones. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78: 4493–4503, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1382-7>.
- [16] G. Ekincioglu, D. Akbay ve M. Sert, Doğaltaşların geri tepme sertlikleri ile bazı kayaç özellikleri arasındaki ilişkilerin incelenmesi. KAYAMEK'2022- 13. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, sayfa 59-66, Isparta, Türkiye, 26-28 Mayıs 2022.
- [17] S. Ghorbani, S. H. Hoseinie, E. Ghasemi and T. Sherizadeh, A review on rock hardness testing methods and their applications in rock engineering. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(11), 1067, 2022-a. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10314-z>.
- [18] Y. Asiri, Standardized Process for Filed Estimation of Unconfined Compressive Strength Using Leeb Hardness. Master Thesis, Dalhousie University, Canada, 2017.
- [19] S. B. Çelik, İ. Çobanoğlu, T. Koralay and K. Gireson, Investigation of the Leeb hardness test in rapid characterisation of rock cores with particular emphasis on the effect of length to diameter ratio. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 37(7), 2023. <https://doi.org/10.1080/17480930.2023.2213549>.
- [20] S. Ghorbani, S. H. Hoseinie, E. Ghasemi and T. Sherizadeh, Application of Leeb hardness test in prediction of dynamic elastic constants of sedimentary and igneous rocks. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(6), 3125-3145, 2022-b. <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02083-z>.
- [21] S. Ghorbani, S. H. Hoseinie, E. Ghasemi and T. Sherizadeh, Adoption of ASTM A956-06 Leeb hardness testing standard to rock engineering applications. *Construction and Building Materials*, 364,

- 129886, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129886>.
- [22] S. B. Çelik and İ. Çobanoğlu, Investigation of the effect of saturated conditions and number of measurements on the Leeb hardness test and improved correlations to estimate basic rock properties. *Acta Geotechnica*, 18(8), 4261–4278, 2023.
<https://doi.org/10.1007/s11440-023-01823-6>.
- [23] Y. Eren, Konya kuzeybatısında Bozdağlar masifinin otokton ve örtü birimlerinin stratigrafisi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 36(2), 7-23, 1993.
- [24] A.M. Özkan, Ulumuhsine-Tatköy (Konya) Civarındaki Üst Miyosen-Alt Pliyosen yaşlı kumtaşlarının petrofasiyes özellikleri. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(3), 229–239, 2000.
- [25] R. Aksoy and A. Demiroz, The Konya earthquakes of 10–11 september 2009 and soil conditions in Konya, central Anatolia, Turkey. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 12(2), 295–303, 2012.
<https://doi.org/10.5194/nhess-12-295-2012>.
- [26] R. Aksoy, Extensional neotectonic regime in west-southwest Konya, central Anatolia, Turkey. *International Geology Review*, 61(14), 1803–1821, 2019.
<https://doi.org/10.1080/00206814.2019.1581996>.
- [27] A. Streickeisen, Classification and nomenclature of volcanic rock. Iomprophyres, corbanatites and millitic rocks. *Geology*, 7, 331–335, 1979.
- [28] TS EN 1936, Natural Stone Test Methods - Determination of Real Density and Apparent Density and of Total and Open Porosity. Turkish Standards Institution, Ankara, 2010.
- [29] ASTM E494, Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
<https://doi.org/10.1520/E0494-95>.
- [30] ASTM A956, Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
https://doi.org/10.1520/A0956_A0956M-22.
- [31] TS EN-12407, Natural Stone Test Methods - Petrographic Examination. Turkish Standards Institution, Ankara, 2019.





Fraksiyonel dereceli osilatörlerin pratik gerçekleştirimi için bir yaklaşım

An approach for practical realization of fractional-order oscillators

İbrahim Ethem Saçu^{1,*} 

¹ Erciyes Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38030, Kayseri, Türkiye

¹ Erciyes Üniversitesi, Klinik Müh. Uyg. ve Arş. Mrk. (ERKAM), 38039, Kayseri, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, fraksiyonel dereceli osilatörlerin pratik gerçekleştirimi için bir yaklaşım önerilmektedir. Bu yaklaşımda, fraksiyonel integral operatörünü sağlamak için s -domeninde birinci dereceden bir yaklaşıklık fonksiyonu türetilmekte daha sonra bu fonksiyon ayrıklaştırma işlemine tabi tutularak z -domenine aktarılmaktadır. Böylece ilgili osilatörün sürekli zamanlı dinamik denklemleri fark denklemlerine dönüştürülerek dijital platformlarda gerçekleştirilebilme imkanı elde edilmektedir. Fark denklemlerinin avantajı, katsayılarının fraksiyonel derecenin değişimine bağlı olarak hızlıca güncellenebilmesidir. Önerilen yaklaşımın uygulanabilirliği Van der Pol (VdP) osilatöründe test edilmiştir. Önerilen yöntem kullanılarak fraksiyonel VdP osilatörünün fark eşitlikleri elde edilmiştir. Nümerik benzetimlerde bu fark denklemlerinden faydalanılmıştır. Ayrıca denklemler bir mikroişlemci uygulama kartında test edilerek önerilen yöntem deneysel olarak da doğrulanmıştır.

Anahtar kelimeler: Fraksiyonel hesaplama, Dinamik sistem, Van der Pol osilatörü, Fraksiyonel türev, Kararlılık

1 Giriş

Fraksiyonel hesaplama, dinamik sistemleri tanımlayan diferansiyel denklemlerin derecesinin tamsayı olması zorunluluğunu ortadan kaldırarak, türev derecelerinin rasyonel veya karmaşık da olabileceği yaklaşımını ortaya koymaktadır. Bu kapsamda birçok fraksiyonel türev ve integral tanımları literatüre sunulmuştur. Fraksiyonel hesaplama, sistemlerin daha doğru ve kapsamlı modellenmesine imkan vermektedir. Yine fraksiyonel dinamik sistemlerde farklı zengin yanıtların elde edilmesi mümkündür. Fraksiyonel derecenin ek tasarım parametresi olarak ele alınması araştırmacılara esneklik tanımaktadır. Fraksiyonel hesaplama kontrol, devre teorisi, biyoloji vb. farklı alanlarda kullanım bulmaktadır [1-3].

Fraksiyonel dereceli diferansiyel eşitlikleri nümerik olarak çözmek ve dinamik yanıtları elde etmek için birçok farklı yöntem önerilmektedir [4]. Bu yöntemlerin çoğunda herhangi bir andaki değişken değeri için değişkenin tüm geçmiş değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Hafıza etkisi olarak da adlandırılan bu durumda zamanın ilerlemesiyle hesaplama işi çok karmaşık ve maliyetli olmaktadır. Yine bunların dijital platformlarda deneysel olarak elde edilip

Abstract

In this study, an approach for the practical implementation of fractional-order oscillators has been proposed. In this approach, a first-order approximation function is derived in the s -domain to satisfy the fractional integral operator, then this function is discretized and transferred to the z -domain. This allows the continuous-time dynamic equations of the oscillator to be transformed into discrete-time difference equations, making it feasible for realization on digital platforms. The advantage of difference equations lies in the ease with which their coefficients can be updated based on changes in the fractional order. The feasibility of the proposed approach is tested on the Van der Pol (VdP) oscillator. The difference equations of the fractional-order VdP oscillator have been obtained by using the proposed method. These difference equations are used in numerical simulations. Furthermore, the equations are tested on a microcontroller application board, and the proposed method is experimentally validated also.

Keywords: Fractional calculus, Dynamic system, Van der Pol oscillator, Fractional derivative, Stability

doğrulanmaları da zorlaşmaktadır. Öte yandan fraksiyonel dinamik eşitlikleri analog ayrık elemanlarla elde etmek istediğimizde, fraksiyonel türev veya integral işlemini gerçekleştirecek bir devre elemanına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaç fraksiyonel kapasitör kavramını ortaya çıkarmaktadır [5]. Ancak kavramsal olan fraksiyonel kapasitörün gerçek karşılığı ticari olarak elektronik marketlerde bulunmamaktadır. Bu sorunun çözümü için fraksiyonel kapasitör işlevini sınırlı bant genişliğinde yerine getirebilecek yaklaşık fonksiyonları yani imitasyon devreleri ortaya konulmaktadır [6]. Bu yaklaşımdaki açmaz ise fraksiyonel kapasitörün değeri ve derecesi değiştikçe imitasyon devrelerindeki R ve C gibi pasif eleman değerleri ile kazanç değerlerinin yeniden ayarlanmasına ihtiyaç duyulmasıdır. İşte her iki yaklaşımdaki sınırlamalar fraksiyonel dinamik sistemlerin gerçekleştirilmesini zorlaştırmaktadır. Bunlara bir çözüm olması açısından pratik gerçekleştirmeler için bu çalışmada bir yaklaşım önerilmektedir. Bu yaklaşıma göre öncelikle fraksiyonel integral operatörünü karşılayacak birinci dereceden yaklaşıklık fonksiyonu s -domeninde türetilmektedir. Daha sonra sürekli-ayrık dönüşüm metoduyla sürekli zamandaki

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: iesacu@erciyes.edu.tr (İ.E. Saçu)

Geliş / Received: 02.08.2023 Kabul / Accepted: 21.08.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1336490

türetilmiş fonksiyon z -domenine geçirilmektedir. Ayrık domende elde edilen yaklaşık fonksiyonu sistem denklemlerine uygulanarak fark denklemleri elde edilmektedir. İlgili denklemler nümerik hesaplamalarda ve dijital platform gerçekleştirimlerinde kullanılabilir. Ayrıca fraksiyonel derece değişikçe sadece fark eşitliklerinin katsayıları değiştirilerek hızlı bir adaptasyon mümkün olmaktadır. Önerilen yaklaşım Van der Pol (VdP) osilatörü üzerinde test edilmiştir [7].

Fraksiyonel hesaplamaların elektronik uygulama alanlarından biri de osilatörlerdir. Osilatörler günümüzdeki birçok elektronik donanımın vazgeçilmez parçasıdır. Fraksiyonel osilatörlerde, faz kayması fraksiyonel derece ile kontrol edilebilir [8]. Yine sinüzoidal osilatörlerde sistem derecesinin en az 2 olma zorunluluğu da fraksiyonel osilatörlerle ortadan kalkmaktadır [9]. Öte yandan fraksiyonel multivibratörlerle daha büyük osilasyon frekansı elde edilebilir [10].

20. yy'ın başlarında vakum tüpleri alıcı ve verici devrelerindeki elektrik akımının akışını kontrol etmede kullanılmaktaydılar. Balthazar Van der Pol, vakum tüpü triyod devresindeki osilasyonları incelemesi sonunda bütün başlangıç koşullarının sınırlı genlikli aynı periyodik yörüngeye yakınsadığı sonucuna ulaşmıştır [11]. Ancak bu davranış lineer eşitliklerin çözümlerinin davranışından farklıdır. Bunun için 1927'de Balthazar Van der Pol vakum tüp elektrik devresindeki osilasyonları tanımlamak için bir eşitlik ortaya koymuştur [7]. Bu eşitlik zorlamalı (forced) ve zorlamasız (unforced) durumlara göre zengin dinamikler sergilemektedir. Bu açıdan dinamik sistemlerin analizinde VdP eşitliği yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Dolayısı ile VdP'nin fraksiyonel versiyonu da önemli olmaktadır.

Bu kapsamda ikinci kısımda fraksiyonel VdP osilatörünün tanımlayıcı eşitlikleri verilmiş ve kararlılık analiziyle minimum γ_{\min} değeri belirlenmiştir. Yine Grünwald-Letnikov metodu (GLM) ile VdP eşitliğinin dinamik yanıtları da ikinci kısımda sunulmuştur. Üçüncü kısımda önerilen pratik yaklaşım detaylıca anlatılmıştır. Fark denklemleriyle elde edilen yanıtlar da bu bölümde verilmiştir. Ayrıca ilgili eşitlikler dijital platforma aktarılarak önerilen yöntemin uygulanabilirliğini göstermek için elde edilen osiloskop ekran görüntüleri de bu bölümde paylaşılmıştır. Sonuç ve değerlendirmeler ise dördüncü bölümde verilmiştir.

2 Fraksiyonel dereceli VdP Osilatörü

Doğrusal olmayan sistemlerdeki karmaşık osilasyonların anlaşılması ve kontrol edilmesi gereken pek çok uygulamada VdP osilatörü önemli bir rol oynamaktadır. Fraksiyonel dereceli VdP osilatörünün tanımlayıcı eşitliği aşağıda verilmektedir [12].

$$\begin{aligned} x_v^\gamma &= y_v \\ y_v^\gamma &= \mu_v(1-x_v^2)y_v - x_v \end{aligned} \quad (1)$$

Burada y_v vakum tüpü akımı, x_v yardımcı değişken, γ fraksiyonel derece ($0 < \gamma < 1$) ve $\mu_v > 0$ dir. İlgili denklemin

denge noktası $E_v(0,0)$ şeklindedir. Ayrıca denge noktasındaki Jacobian matrisi ise aşağıdaki gibidir.

$$J_v = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & \mu_v \end{pmatrix} \quad (2)$$

J_v matrisinden özdeğerler $\lambda_{v,1,2}$ Denklem (3)'teki gibi elde edilmektedir.

$$\lambda_{v,1,2} = \frac{\mu_v \pm \sqrt{\mu_v^2 - 4}}{2} \quad (3)$$

Fraksiyonel sistemlerde kararlılık şartı her bir öz değer için $\gamma_{\min} > (2x | \angle \lambda_{v,1,2} | / \pi)$ şartını sağlamasıdır [13]. Bu şarta göre $0 < \mu_v < 2$ için bir γ_{\min} değeri söz konusudur ancak $\mu_v > 2$ için her γ değeri sistemi sağlar. Örneğin $\mu_v = 0.5$ için öz değerler $\lambda_{v,1,2} = 0.25 \pm 0.9682$ ve bunlara bağlı olarak $\gamma_{\min} = 0.8391$ olarak elde edilmektedir. Dolayısıyla sistemin çalışabilmesi için fraksiyonel derece ve parametreler seçilirken kararlılık analizi dikkate alınmalıdır.

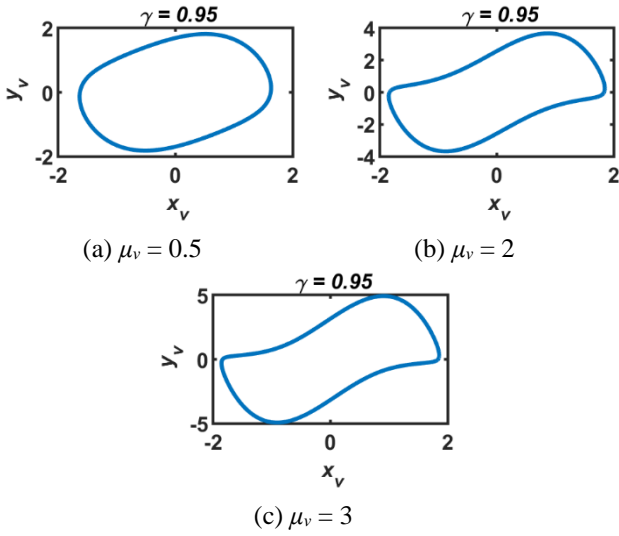
Denklem (1) ile verilen VdP eşitliğini nümerik olarak çözmek için literatürde çeşitli metotlar sunulmuştur. Bunlardan bir tanesi Grünwald-Letnikov metodu (GLM)'dur [12]. Denklem (1)'e GLM uygulandığında aşağıdaki ifadeler elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} x_v(t_i) &= y_v(t_{i-1})h_v^\gamma - \sum_{j=1}^i b_j^{(\gamma)} x_v(t_{i-j}) \\ y_v(t_i) &= [\mu_v(1-x_v(t_i)^2)y_v(t_{i-1}) \\ &- x_v(t_i)]h_v^\gamma - \sum_{j=1}^i b_j^{(\gamma)} y_v(t_{i-j}) \end{aligned} \quad (4)$$

Burada h_v adım büyüklüğü olup hesaplamalarda $h_v = 0.005$ olarak alınmıştır. Ayrıca $b_j^{(\gamma)}$ ise binom katsayılarıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir [1].

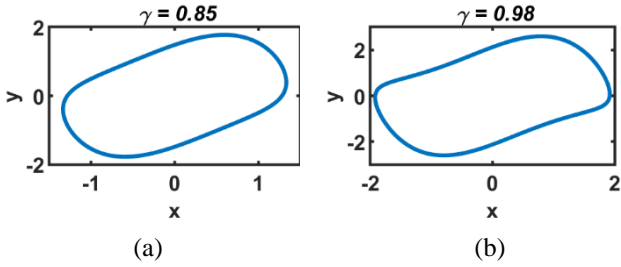
$$b_0^{(\gamma)} = 1, \quad b_j^{(\gamma)} = \binom{j-1-\gamma}{j} b_{j-1}^{(\gamma)} \quad (5)$$

GLM metodu kullanılarak $\mu_v = 0.5, 2$ ve 3 için elde edilen nümerik benzetim sonuçları faz portresi formunda Şekil 1'de sunulmaktadır. Burada $\mu_v = 0.5$ için $\gamma_{\min} = 0.8391$ olduğundan fraksiyonel derece $\gamma = 0.95$ olarak alınmaktadır. Öte yandan $\mu_v = 2$ ve 3 durumlarını her γ değeri sağladığından fraksiyonel derece $\gamma = 0.85$ olarak alınmaktadır. Ek olarak $\mu_v = 1$ iken $\gamma = 0.85$ ve 0.98 için elde edilen benzetim sonuçları Şekil 2'de verilmektedir. Şekil 1'den μ_v parametresinin değerinin VdP osilatörünün yanıt şeklini değiştirdiği açıkça görülmektedir. Benzer şekilde μ_v sabitken sistem yanıtı fraksiyonel derece γ ile değişim sergilemektedir ki bu ise fraksiyonel sistemlerin getirdiği bir zenginliktir. Öte yandan μ_v parametresi ve fraksiyonel derece arttıkça y_v ve x_v durum değişkenlerinin genliklerinin arttığı da x - y eksenlerinin sınırlarından anlaşılabilir.



Şekil 1. GLM ile elde edilen nümerik benzetim sonuçları

Denklem (1) ile verilen fraksiyonel VdP eşitliğine Laplace dönüşümü, klasik matematikteki benzer şekilde uygulanabilir [1]. Başlangıç şartları sıfırken Denklem (1)'e Laplace dönüşümü uygulanırsa Denklem (6) elde edilmektedir.



Şekil 2. GLM ile elde edilen nümerik benzetim sonuçları ($\mu_v = 1$)

$$\begin{aligned} x_v &= \frac{1}{s^\gamma} y_v \\ y_v &= \frac{1}{s^\gamma} [\mu_v (1 - x_v^2) y_v - x_v] \end{aligned} \quad (6)$$

Burada $(1/s^\gamma)$ ifadesi fraksiyonel integral operatörüdür. Ancak bu operatörü sağlayacak ticari bir eleman elektronik mağazalarda söz konusu değildir. Araştırmacılar bu soruna bir çözüm olarak ilgili operatörü belli bir bant genişliğinde sağlayacak yaklaşıklık fonksiyonları türetmektedir. Bu metotlardan en yaygın olanı sürekli fraksiyonel açılım metodu (SFAM) dur. İlgili metoda göre elde edilen birinci dereceden yaklaşıklık fonksiyonu aşağıdaki gibidir [14].

$$\frac{1}{s^\gamma} \approx \frac{(1-\gamma)s + (1+\gamma)}{(1+\gamma)s + (1-\gamma)} \quad (7)$$

Denklem (7) ile verilen yaklaşıklık fonksiyonu ayrıklaştırma metotları kullanılarak z -domenine geçirilebilir. Bu kapsamda burada Al-Alaoui operatöründen

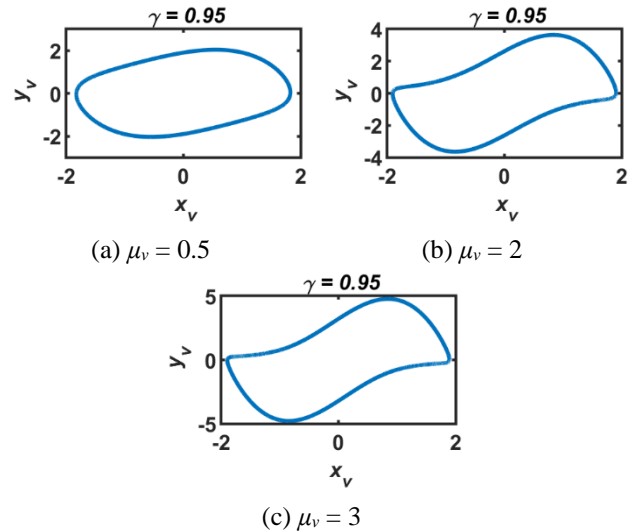
faydalanılacaktır [15]. Denklem (8)'de Al-Alaoui operatörünün yanı sıra bu operatörün Denklem (1)'e uygulanmasıyla elde edilen fark eşitlikleri sunulmaktadır.

$$\begin{aligned} s &= \frac{8(z-1)}{T_o(7z+1)} \\ x_v[n] &= \frac{-m_5}{m_6} x_v[n-1] + \frac{m_3}{m_6} y_v[n] + \frac{m_2}{m_6} y_v[n-1] \\ y_v[n] &= \frac{-m_5}{m_6} y_v[n-1] + \frac{m_3}{m_6} \{ \mu_v (1 - x_v[n]^2) y_v[n] \\ &\quad - x_v[n] \} + \frac{m_2}{m_6} \{ \mu_v (1 - x_v[n-1]^2) y_v[n-1] - x_v[n-1] \} \end{aligned} \quad (8)$$

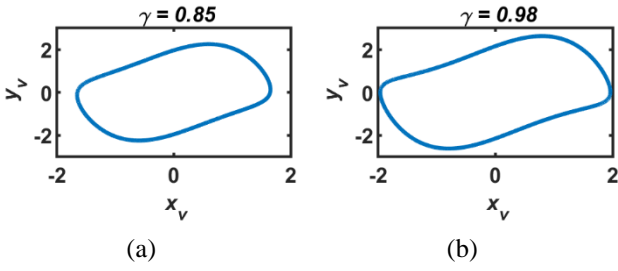
Burada T_o örnekleme zamanı iken m_2 , m_3 , m_5 ve m_6 terimleri aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} m_2 &= -8 + 8\gamma + T_o + T_o\gamma \\ m_3 &= 8 - 8\gamma + T_o + T_o\gamma \\ m_5 &= -8 - 8\gamma + T_o - T_o\gamma \\ m_6 &= 8 + 8\gamma + T_o - T_o\gamma \end{aligned} \quad (9)$$

Parametreler $T_o = 0.01$ ve $\gamma = 0.95$ iken $\mu_v = 0.5, 2$ ve 3 için Denklem (8) ile elde edilen benzetim sonuçları Şekil 3'te sunulmaktadır. Öte yandan $\mu_v = 1$ iken $\gamma = 0.85$ ve 0.98 için elde edilen sonuçlar Şekil 4'te sunulmaktadır. Şekiller 1 ve 3 ile 2 ve 4 karşılaştırdığımızda dinamik sistem yanıtlarının örtüştüğü açıkça görülmektedir. Dolayısı ile önerilen yaklaşım etkin olduğu söylenebilir.



Şekil 3. Önerilen yaklaşım ile elde edilen nümerik benzetim sonuçları



Şekil 4. Önerilen yaklaşım ile elde edilen nümerik benzetim sonuçları ($\mu_v = 1$)

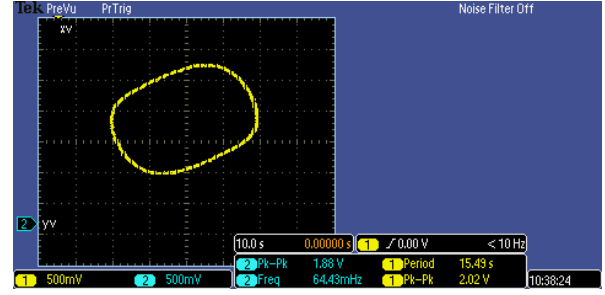
3 Fraksiyonel VdP Osilatörünün dijital gerçekleştirimi

Analog ayrık elemanlarla bir sistemin gerçekleştirilmesi yerine dijital platformlarda gerçekleştirilmesinin en önemli avantajı yeniden ayarlanabilir olma özelliğidir. Özellikle fraksiyonel sistemlerde sistem derecesinin değiştirilerek farklı tepkilerin elde edilmesi nedeniyle bu sistemlerin dijital programlanabilir yapılarda gerçekleştirilmesi makul bir tercih olacaktır.

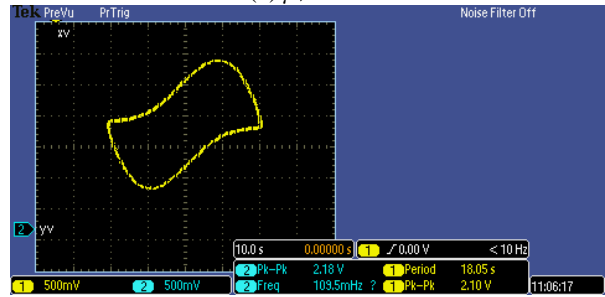
Önerilen yaklaşımı deneysel doğrulamak adına Arduino DUE kartından faydalanılacaktır. DUE kartı 84 MHz saat frekansına ve 2 adet dijital-analog dönüştürücü (DAC) çıkışıyla öne çıkmaktadır. VdP osilatörünün gerçekleştirilmesi için Denklem (8) ilgili uygulama kartına Arduino derleyicisi yazım dili kullanılarak kodlanacak ve aktarılacaktır. Ancak bu noktada iki hususa dikkat etmek gerekir. Bunlardan birincisi DUE kartının maksimum çıkış geriliminin 3.3V olmasıdır. Dolayısıyla sistem değişkenlerinin genliklerinin 3.3V'u geçmemesi gerekir bu nedenle genlik ölçeklendirmesi yapılmaktadır. Genlik ölçekleme, zayıflatma ve kuvvetlendirme şeklinde ikiye ayrılabilir. Kuvvetlendirme işleminde gürültü bileşenlerinin genliğinin de artacağı unutulmamalıdır. Ayrıca sonuçları doğrudan fiziksel olarak yorumlamayı da zorlaştırabilir. Zayıflatma işleminde ise çok küçük genlikli sinyallerde kayıp olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Ancak genlik ölçekleme, değişkenleri karşılaştırmayı kolaylaştırırken, yuvarlatma hataları ve sistem sınırları dışına çıkmayı önleyerek ciddi avantaj sağlar.

Diğer husus ise DUE kartının çıkışının 0V altında değerler almamasıdır bunun içinde sistem değişkenleri negatif değerler almayacak şekilde ötelenmektedir. Her iki husus dikkate alınarak x_v değişkeni 2V ötelenmekte ve 4 kat zayıflatılmakta, y_v durum değişkeni ise genliğe bağlı olarak ya 3V ötelenmekte ve 6 kat zayıflatılmakta yahut 5V ötelenmekte ve 10 kat zayıflatılmaktadır. İlgili ayarlamalarla DUE çıkışlarından ölçülerek elde edilen durum değişkenlerinin faz portesi Şekil 5 ve 6'da verilmektedir. Şekil 3a ile 5a, Şekil 3c ile 5b, Şekil 4 ve 6 karşılaştırıldığında deneysel ve nümerik benzetim sonuçlarının uyumlu olduğu açıkça görülebilmektedir. Nümerik sonuçlarda olduğu gibi μ_v parametresi ve fraksiyonel derece arttıkça y_v ve x_v durum değişkenlerinin genliklerinin arttığı osiloskop ekran görüntülerindeki "Pk-Pk" değerlerinden gözlemlenebilir. Dolayısıyla gerek nümerik benzetimler gerekse deneysel sonuçlar önerilen yaklaşımın pratik ve uygulanabilirliğini açıkça ortaya

koymaktadır. Bu çalışmada VdP osilatörü örnek uygulama olarak ele alınsa da önerilen yaklaşım farklı fraksiyonel dinamik sistemlerin pratik gerçekleştirilmesinde de uygulanabileceği söylenebilir.

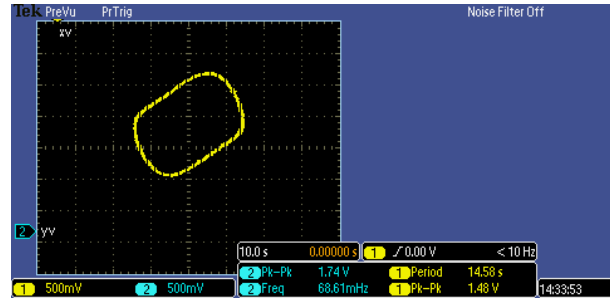


(a) $\mu_v = 0.5$

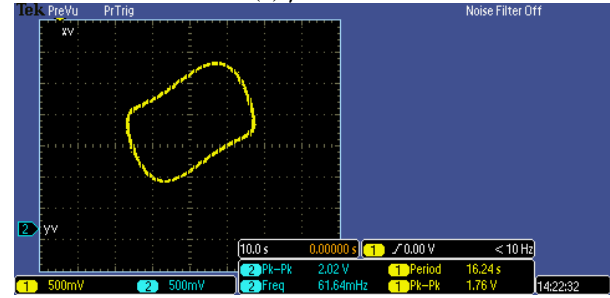


(b) $\mu_v = 3$

Şekil 5. Osiloskop ekran görüntüleri ($\gamma = 0.95$)



(a) $\gamma = 0.85$



(b) $\gamma = 0.98$

Şekil 6. Osiloskop ekran görüntüleri ($\mu_v = 1$)

4 Sonuçlar

Bu çalışmada fraksiyonel dereceli sistemlerin hızlı ve pratik gerçekleştirilmesi için bir yaklaşım önerilmektedir. Önerilen yaklaşımla nümerik benzetim sonuçları deneysel olarak da doğrulanabilmektedir. Öte yandan, ilgili

yaklaşım ile elde edilen fark denklemlerinin katsayıları değiştirilmek suretiyle farklı dinamik yanıtlar elde edilebilmektedir. Bu ise önerilen metodun esnek ve ayarlanabilir özelliğini göstermektedir. VdP osilatör eşitliği örnek uygulama olarak seçilse de ilgili yöntem farklı fraksiyonel sistemlerin gerçekleştirilmesi için de uygun bir alternatif olarak ön plana çıkmaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı : %9

Kaynaklar

- [1] D. Baleanu, K. Diethelm, E. Scalas, and J. J. Trujillo, Fractional Calculus: Models and Numerical Methods. World Scientific, 2012. <https://doi.org/10.1142/10044>
- [2] M. Dalir, and M. Bashour, Applications of fractional calculus. Applied Mathematical Sciences, 4(21), 1021–1032, 2010.
- [3] H. Sun, Y. Zhang, D. Baleanu, W. Chen, and Y. Chen, A new collection of real world applications of fractional calculus in science and engineering. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 64, 213–231, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2018.04.019>
- [4] C. Li, and F. Zeng, Numerical Methods for Fractional calculus. CRC Press, 2015.
- [5] G. Carlson, and C. Halijak, Approximation of fractional capacitors $(1/s)^{1/n}$ by a regular Newton process. IEEE Transactions on Circuit Theory, 11(2), 210–213, 1964. <https://doi.org/10.1109/TCT.1964.1082270>
- [6] M. S. Semary, M. E. Fouda, H. N. Hassan, and A. G. Radwan, Realization of fractional-order capacitor based on passive symmetric network. Journal of Advanced Research, 18, 147–159, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2019.02.004>
- [7] B. van der Pol, The nonlinear theory of electric oscillations. Proc. IRE 22, 1051–1086, 1934.
- [8] J. H. He, The simpler, the better: Analytical methods for nonlinear oscillators and fractional oscillators. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 38(3–4), 1252–1260, 2019. <https://doi.org/10.1177/1461348419844>
- [9] M. Li, Three classes of fractional oscillators. Symmetry, 10(2), 40, 2018. <https://doi.org/10.3390/sym10020040>
- [10] İ. E. Saçu, and M. Alçı, An electronically controllable fractional multivibrator. IETE Journal of Research, 67(3), 313–321, 2021. <https://doi.org/10.1080/03772063.2018.1548909>
- [11] B. van der Pol, A theory of the amplitude of free and forced triode vibrations. Radio Review, 1, 701–710, 754–762, 1920.
- [12] R. S. Barbosa, J. A. T. Machado, B. M. Vinagre, and A. J. Calderón, Analysis of the Van der Pol oscillator containing derivatives of fractional order. Journal of Vibration and Control, 13(9–10), 1291–1301, 2007. <https://doi.org/10.1177/1077546307077463>
- [13] M.S. Tavazoei and M. Haeri, A note on the stability of fractional order systems. Math. Comput. Simul., 79(5), 1566–1576, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2008.07.003>
- [14] B. T. Krishna, Studies on fractional order differentiators and integrators: a survey. Signal Processing, 91, 386–426, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2010.06.022>
- [15] M. A. Al-Alaoui, Al-Alaoui operator and the new transformation polynomials for discretization of analogue systems. Electr Eng, 90, 455–467, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00202-007-0092-0>





Derin öğrenme ile panoramik radyografi görüntülerinden diş segmentasyonu: UNet, FPN ve PSPNet karşılaştırması

Tooth segmentation from panoramic radiography images with deep learning: comparison of UNet, FPN and PSPNet

Salih Taha Alperen Özçelik^{1,*}, Hüseyin Üzen², Abdülkadir Şengür³, Adalet Çelebi⁴

¹ Bingöl Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi 12000, Bingöl, Türkiye

² Bingöl Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi 12000, Bingöl, Türkiye

³ Fırat Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi 23000, Elazığ, Türkiye

⁴ Mersin Üniversitesi, Ağız, Diş ve Çene Cerrahisi Bölümü, Diş Hekimliği Fakültesi 33000, Mersin, Türkiye

Öz

Panoramik radyografi, diş hastalıklarının erken teşhis ve tedavisinde yaygın olarak kullanılan bir araçtır. Ancak bu tekniklerin başarısı, diş hekiminin deneyimine ve doğru yorum yapma yeteneğine bağlıdır. Bu çalışmada, insan hatasını azaltmak ve hızlı çözümler sunmak amacıyla panoramik radyografi görüntülerinden derin öğrenme ile diş segmentasyonu yapılmıştır. 18-65 yaş arasındaki hastalardan alınan 313 panoramik radyografi görüntüsü, deneyimli bir ağız ve çene cerrahisi tarafından piksel seviyesinde etiketlenmiştir. UNet, FPN ve PSPNet mimarileri ile segmentasyon yapılmış, VGG16 omurga ağı ile UNet modeli %93,74 F1 skoru, %88.22 KüB ve %98.25 doğruluk ile en iyi sonucu vermiştir. Ayrıca EfficientNet, ResNet50, InceptionV3, DenseNet121 ve MobileNet omurga ağları ile denemeler yapılmış, en yüksek performans EfficientNet omurga ağı ile %93.91 F1 skoru, %88.52 KüB ve %98.26 doğruluk olarak elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Derin öğrenme, Diş segmentasyonu, UNet

1 Giriş

Ağız ve diş sağlığı sorunları, sadece günlük yaşam kalitesini ciddi şekilde etkilemekle kalmaz, aynı zamanda bazı durumlarda ciddi sağlık komplikasyonlarına ve hatta ölümlere yol açabilir [1, 2] Dünya sağlık örgütünün verilerine göre dünya çapında yaklaşık 3,5 milyar insan ağız ve diş sağlığı sorunlarıyla karşı karşıyadır [3]. Diş çürükleri, periodontal hastalıklar, ağız kanserleri ve diş kaybı bu sorunlardan başlıcalarıdır. Bu sorunlara erken tanı koyulması ve doğru bir tedavi planlanması hastalar için büyük önem arz etmektedir. Panoramik radyografi gibi ileri düzey görüntüleme teknikleri bu aşamada uzman diş hekimlerine yardımcı olarak kullanılan en yaygın araçlardır. Fakat bu süreçler, diş hekiminin deneyimi ve doğru yorum yapma yeteneğiyle doğrudan ilişkilidir. İşte bu iki özelliğin yetersiz olması durumu yanlış tanı ve gereksiz tedavi gibi birçok sorunu da yanında getirmektedir [4]. Derin öğrenme yöntemleri tıbbi görüntülerin işlenmesi konusunda son yıllarda oldukça etkili bir araç haline gelmiştir [5].

Abstract

Panoramik radiography is a widely used tool for the early diagnosis and treatment of dental diseases. However, the success of these techniques depends on the dentist's experience and ability to interpret correctly. In this study, dental segmentation was performed using deep learning on panoramic radiography images to reduce human error and provide faster solutions. A total of 313 panoramic radiographs from patients aged 18-65 were pixel-wise labeled by an experienced oral and maxillofacial surgeon. Segmentation was performed using UNet, FPN, and PSPNet architectures, and the UNet model with a VGG16 backbone achieved the best result with a 93.74% F1 score, 88.22% IoU, and 98.25% accuracy. Additionally, tests were conducted with EfficientNet, ResNet50, InceptionV3, DenseNet121, and MobileNet backbones, with EfficientNet showing the highest performance with a 93.91% F1 score, 88.52% IoU, and 98.26% accuracy.

Keywords: Deep learning, Tooth segmentation, UNet

Panoramik radyografi görüntülerinin kullanılarak dişlerin derin öğrenme ile otomatik segmente edilmesi diş hekimlerine erken teşhis ve tedavi planlamada yardımcı olabilecektir. Derin öğrenme sayesinde daha az hatayla ve daha yüksek hızda diş hastalıklarını tespit edebilecek ve daha fazla hastayla ilgilenebilmesini sağlayacaktır. Diş taramada derin öğrenme tabanlı segmentasyon tekniklerinin gelişmesi son yıllarda önemli bir ivme kazanmıştır. Dişlerin tespit edilmesi, segmentasyonu ve numaralandırılması için Mask-RCNN Evrişimsel Sinir Ağını (ESA) kullanan Oktay vd. [6], tarafından geliştirilen yöntem, her diş türüne benzersiz bir sınıf adı vererek çoklu sınıflandırma gerçekleştirmektedir. 200 görüntü üzerinde eğitilen ve 278 panoramik diş röntgeni üzerinde test edilen yöntemin, diş tespitinde ortalama başarı oranı %98, segmentasyon için F1 skoru ise %93 olarak belirlenmiştir. Diş görüntülerinin segmentasyonu için derin evrişimli sinir ağları ve seviye set yöntemini kullanan Yang vd. [7] Dental pulpu segmente ederek dişlerin konumunu belirlemeye odaklanmışlar ve bu amaçla U-Net modelini eğitmişlerdir. Model, 10 örnek içeren bir CBCT veri setinde

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: sozcelik@bingol.edu.tr (S. T. A. Özçelik)

Geliş / Received: 07.06.2024 Kabul / Accepted: 23.08.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1497540

test edilmiştir. Önerdikleri model, ortalama Dice katsayısı 0.9791 ve ortalama Jaccard katsayısı 0.9595 olacak şekilde yüksek doğrulukta diş segmentasyonu sağlamıştır. Diş tanımlaması için Faster R-CNN ve diş numaralandırması için VGG-16 evrişim mimarisi kullanan Alam vd. [8], FDI iki haneli numaralandırma sistemine göre etiketleme yapmıştır. Kullanılan veri seti, 1500 panoramik diş röntgeni içerir ve bu görüntüler, The Southwest State University of Bahia (UESB)'deki teşhis görüntüleme merkezinde toplanmıştır. Diş tanımlama için %87.85 duyarlılık, %89.80 kesinlik ve %88.81 F-ölçüsü; diş numaralandırma için ise %84.03 duyarlılık ve %86.50 kesinlik elde edilmiştir. Diş segmentasyonu için Mask R-ESA ağ mimarisi kullanan Rubiu vd. [9] Tufts Dental veri kümesinden alınan görüntülere ISO 3950 standardına göre etiketleme gerçekleştirmiştir. Veri seti, 1000 panoramik dental radyograf içeren Tufts Dental Database'den elde edilmiştir. Ön işleme olarak, görüntü parlaklığı, kontrastı, kırılması ve boyutunun değiştirilmesi gibi veri artırma teknikleri uygulanmıştır. Elde edilen değerlendirme metrikleri arasında test setinde doğru sınıflandırılmış dişlerin yüzdesi %98,4 ve Dice skoru 0.87 olarak belirlenmiştir. Diş tanımlamak için U-Net tabanlı bir İlgili Alanı (İA) çıkarma modeli ve Hybrid Task Cascade tabanlı diş segmentasyonu ve numaralandırma modeli kullanan Xu vd. [10], 6046 panoramik radyograf içeren bir veri kümesi toplamış ve bu verilerin etiketlenmesi manuel olarak gerçekleştirilmiştir. Segmentasyon için %98.67 doğruluk ve %98.56 geri çağırma oranı elde eden araştırmacılar, numaralandırma için %97.83 doğruluk ve %97,73 geri çağırma oranı elde etmiştir. Ön işleme sürecinin daha da iyileştirilmesi gerekliliği ve diş numaralandırma hatalarını çözme ihtiyacı da çalışmanın eksiklikleri olarak sayılabilir. Panoramik diş röntgenlerinde otomatik diş numaralandırma için bir ESA geliştiren Privado vd. [11], 8000 anonimleştirilmiş panoramik diş görüntüsü kullandı. Bu veri seti, diş hekimliği alanında üç yıldan fazla deneyime sahip iki uzman tarafından etiketlendi. Nesne tespiti ve sınıflandırma olmak üzere iki ana katmandan oluşan bir ESA mimarisi kullanıldı. Nesne tespiti için Matterport Mask-R ESA ve sınıflandırma için ResNet101 kullanıldı. Araştırmacılar, modelin eğitimi için transfer öğrenme yöntemini de uyguladılar. Geliştirdikleri model, diş tespitinde %99.24 ve diş numaralandırmada %93.83 doğruluk oranı elde etti. Çalışmanın eksiklikleri arasında, bazı durumlarda diş eksikliğinin yanlış tespit edilmesi ve protez taçlarının tek diş olarak algılanması gösterilebilir. 1005 panoramik X-ray görüntüsünden oluşan bir veri seti kullanan Yüksel vd. [12], tedavi tespiti ve numaralandırma için toplam 1005 görüntü etiketlediler. Diş bölgelerinin etiketlenmesi için ise 500 görüntü etiketlediler. YOLO ve diğer nesne tespit modelleri gibi çeşitli derin öğrenme mimarileri kullanılmıştır. Ön işleme olarak, görüntülerin dönüştürülmesi ve veri artırma teknikleri uygulayan araştırmacılar, modelin performansını, %89.4 Ortalama Hassasiyet skoru (numaralandırma için) ve %59.0 (tedavi tespiti için) ile değerlendirmiştir. Çalışmanın eksiklikleri arasında, veri setinin küçük olması ve nadir tedavi türlerinin yetersiz temsili bulunmaktadır. Lin ve Chang [13], diş segmentasyonu ve numaralandırması için U-Net ve FCN-8s

mimarilerini kullandılar. Segmentasyon için poligonal etiketleme, numaralandırma için sınırlayıcı kutu yöntemleri tercih edildi. Veri seti, Tayvan'daki bir diş kliniğinden alınan panoramik diş röntgenlerinden oluşuyordu. Ön işleme olarak histogram eşitleme ve normalizasyon uygulandı. Değerlendirme metrikleri arasında %97.54 Kesişim Üzerinden Birleşim (KüB), %95.62 diş numaralandırma doğruluğu, %98.33 diş durumu tanımlama doğruluğu elde ettiler. Tian vd. [14], yüksek çözünürlüklü 3D diş modelleri içeren bir veri seti kullandılar. Segmentasyon için, derin ESA kullanan hiyerarşik bir diş segmentasyon mimarisi uygulandı. Bu mimari, iki seviyeli hiyerarşik diş sınıflandırma ağı ve üç seviyeli hiyerarşik diş segmentasyon modelini içeriyor. Segmentasyon sınırlarını iyileştirmek için koşullu rastgele alan modeli de kullanıldı. Ağ, Level-1'de %95.96 ve Level-2'de %88.06 sınıflandırma başarısı sağladı. Diş segmentasyonu başarısı ise %89.81 olarak kaydedildi. Tek bir 3D intraoral taramadan ne kadar temsilci bilginin öğrenilebileceğini inceleyen Jana vd. [15], on farklı yöntem kullanılarak bu durum nicel olarak değerlendirilmiştir. Tek bir 3B intraoral tarama ile eğitim yapıldığında, Dice skoru 0.86'ya kadar yükselebilirken, tam eğitim seti ile elde edilen Dice skoru 0.94 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, uygun koşullar altında, örneğin veri artırma ile, segmentasyon yöntemlerinin tek bir 3B diş nokta bulutu taramasından önemli miktarda bilgi öğrenebileceği sonucuna varılmıştır. KIBT taramalarında çene ve dişlerin doğru bir şekilde segmentasyonu için Wang vd. [16] tarafından bir yöntem geliştirildi. Otuz KIBT taraması kullanılarak bir karışık ölçekli yoğun (KÖ-Y) evrişimli sinir ağı eğitildi. Ağın performansı, Dice benzerlik katsayısı ve yüzey sapması gibi ölçümlerle değerlendirildi. Sonuçlar, KÖ-Y ağıyla segmente edilen KIBT taramalarının altın standart segmentasyonlarla büyük bir örtüşme gösterdiğini (Dice benzerlik katsayısı: çene için 0.934 ± 0.019 , dişler için 0.945 ± 0.021) ve yüzey sapmasının da küçük olduğunu (çene için 0.390 ± 0.093 mm, dişler için 0.204 ± 0.061 mm) gösterdi. Ayrıca, KÖ-Y ağının bir KIBT taramasını segmente etmek için yaklaşık 25 saniye sürdüğü, manuel segmentasyonun ise yaklaşık 5 saat aldığı bulundu. Bu çalışma, çene ve dişlerin otomatik segmentasyonunda KÖ-Y ağının başarılı olduğunu ve bu yöntemin KIBT taramalarında çoklu sınıf segmentasyonunun gerçekleştirilmesini sağladığını gösterdi.

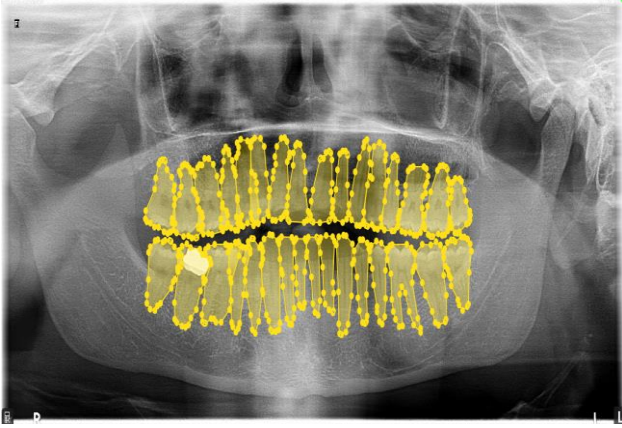
Bu çalışmada 313 panoramik radyografi görüntüsünden oluşan bir veri kümesi oluşturulmuştur. Bu görüntülerdeki dişler uzman diş hekimi tarafından etiketlenmiştir. Elde edilen veri kümesi UNet, FPN ve PSPNet mimarileri kullanılarak eğitilmiş ve segmente edilmiştir. Kullanılan verilerin %80'i eğitime %20'si teste ayrılmıştır. Bu üç mimariyi kıyaslama amaçlı ilk segmentasyon VGG16 omurga ağı ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen segmentasyon sonucunda %93.74 F1 skor ve %88,22 KüB ve %98.25 doğruluk ile en yüksek segmentasyon başarısını UNet göstermiştir. Ayrıca en yüksek başarıyı veren UNet ağ mimarisi omurga ağları değiştirilerek tekrar eğitilmiştir. Omurga ağı olarak Efficientnet [17], ResNet50 [18], InceptionV3 [19], DenseNet121 [20] ve MobileNetv2 [21] mimarileri kullanılmıştır. UNet üzerinden tüm omurga ağları performans açısından kıyaslanmıştır. En yüksek başarıyı

%93.91 F1 skoru ve %88.52 KüB ve %98.26 doğruluk ile EfficientNet omurga ağı sağlamıştır.

2 Materyal ve metod

2.1 Veri kümesi

Bu çalışmada kullanılan veri kümesi, çeşitli yaş gruplarından ve farklı diş problemleri olan hastaların özel diş kliniklerinden elde edilen 500 panoramik radyografi görüntüsünden oluşmuştur. Görüntüler, 18-65 yaş arasındaki hastaları kapsamaktadır ve veri seti, kist, çene kırığı gibi spesifik durumlar hariç tutularak oluşturulmuştur. Veri kümesi, 18-65 yaş arasındaki hastaları içermekte olup kist, çene kırığı gibi durumlar ve çözünürlüğü düşük görüntüler veri kümesine dahil edilmemiştir. Bu şartlara uyularak gerçekleştirilen eliminasyon süreci sonucunda 313 panoramik radyografi görüntüsünden oluşan bir veri kümesi oluşturulmuştur. Veri kümesi hastaların isim ve cinsiyet gibi kişisel bilgilerini içermeyen anonim olarak toplanmıştır. Bu retrospektif araştırma 2023/13-37 numaralı etik kurul kararıyla Fırat Üniversitesi Hastanesi Etik kurulu tarafından onaylanmıştır. Panoramik radyografi görüntüleri (2700-3000) x 1316 piksel çözünürlükte ve 8 bit derinlikte jpeg formatında kaydedilmiştir. Elde edilen görüntüler 10 yıl üzerinde deneyime sahip ağız ve çene cerrahı tarafından her bir diş piksel seviyesinde çokgensel etiketleme (PSÇE) yöntemiyle etiketlenmiştir. Etiketlenmiş bir diş radyografisi görüntüsü Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Etiketlenmiş bir panoramik diş radyografisi

Literatürdeki çalışmaların birçoğunda kullanılan sınırlayıcı kutu (SK) yöntemi ile diş etiketlemesi gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem dişin tamamını bir dikdörtgen kutuya çerçevesine alarak etiketlenmesine verilen isimdir. PSÇE ile SK karşılaştırıldığında PSÇE, gerçek diş sınırlarını daha keskin bir şekilde temsil etmesi, arka plan bilgisini minimize etmesi sayesinde dişlerin daha doğru bir şekilde arka plandan ayrışmasını sağlayacaktır.

2.2 Önerilen model

Elde edilen veri kümesi FPN [22], PSPNet [23] ve UNet [24] ile eğitilmiştir. Modelde verilerin %80’i eğitim için %20’si test için kullanılmıştır. Giriş görüntüleri 256x512 boyutuna uygulanarak veri artırma tekniği uygulanmıştır.

2.2.1 FPN

256x512 boyutlarındaki panoramik diş röntgen görüntüsü ağ mimarisine giriş olarak verilmiştir. Ağ bu gelen giriş görüntüsünden farklı çözünürlüklerde özellik haritaları çıkarır. VGG16’nın [25] belli katmanlarından elde edilen öznelik haritaları C_2, C_3, C_4, C_5 Denklem (1)’deki gibi tanımlanır:

$$\begin{aligned} C_2 &= Conv2_2(I) \\ C_3 &= Conv3_3(C_2) \\ C_4 &= Conv4_3(C_3) \\ C_5 &= Conv2_2(C_4) \end{aligned} \quad (1)$$

Burada I giriş görüntüsü $ConvX_y$ ise VGG16’nın x ’inci katmanın y ’inci evrişim bloğunu temsil eder.

Üst seviyeden alt seviyeye doğru bir yol kullanarak daha yüksek seviyedeki özneliklerle düşük seviyedeki öznelik haritalarıyla birleştirir. Yukarı örnekleme işlemi bilinear interpolasyon yöntemi ile gerçekleştirilir. Bu işlem Denklem (2)’de verilmiştir.

$$P_l = Upsample(P_{l+1}) \quad (2)$$

Burada P_{l+1} , $l + 1$ seviyesindeki öznelik haritasını P_l ise yukarı örneklenmiş l seviyesindeki özellik haritasını temsil eder. Bu yukarı aşağı yolunda daha yüksek seviyeli öznelik haritaları yukarı örneklenir. Aynı boyutlardaki düşük seviyeli öznelik haritalarıyla birleştirilir. Yan bağlantılar kullanılarak temel ağın farklı seviyelerinden gelen öznelikler yukarı örneklenen haritalarla birleştirilerek her seviyede daha detaylı öznelikler elde edilir. Bu birleşim Denklem (3)’te verilmiştir.

$$P_l = Conv(C_l) + Upsample(P_{l+1}) \quad (3)$$

Burada C_l temel ağın l seviyesindeki özellik haritasını conv ise 1x1 evrişim işlemini temsil eder. Bu birleşim her seviye için tekrarlanarak gerçekleştirilir.

$$\begin{aligned} P_5 &= Conv(C_5) \\ P_4 &= Conv(C_4) + Upsample(P_5) \\ P_3 &= Conv(C_3) + Upsample(P_4) \\ P_2 &= Conv(C_2) + Upsample(P_3) \end{aligned} \quad (4)$$

Birleşim işlemlerinden sonra, her seviyede oluşturulan özellik haritaları daha fazla işlenir ve son özellik haritaları (FPN’nin çıktıları) elde edilir:

$$\begin{aligned} P_2' &= Smooth(P_2) \\ P_3' &= Smooth(P_3) \\ P_4' &= Smooth(P_4) \\ P_5' &= Smooth(P_5) \end{aligned} \quad (5)$$

Burada $Smooth$ işlemi 3x3 evrişimlerle özellik haritalarının daha yumuşatılmasını ifade eder. FPN, bu birleşimden sonra her seviyedeki öznelik haritalarını işleyerek segmentasyonda kullanılmak üzere çıktı öznelik haritaları oluşturur.

2.3.3 Kesinlik

Kesinlik, modelin pozitif olarak tahmin ettiği örneklerin gerçekte ne kadarının doğru olduğunu belirtir. Bu metrik, yanlış pozitiflerin (modelin pozitif olarak sınıflandırdığı fakat aslında negatif olan örnekler) oranını belirlemek için kullanılır. Kesinlik şu formül ile hesaplanır:

$$Kesinlik = \frac{Gerçek\ Pozitifler}{Gerçek\ Pozitifler + Yanlış\ Pozitifler} \quad (8)$$

Burada yanlış pozitif modelin pozitif olarak sınıflandırdığı fakat aslında negatif olan örnekleri temsil eder. Gerçek pozitif ise, modelin doğru bir şekilde pozitif olarak sınıflandırdığı örneklerdir.

2.3.4 Duyarlılık

Duyarlılık, modelin gerçek pozitif örnekleri doğru bir şekilde tanımlama yeteneğini ifade eder. Bu metrik, yanlış negatiflerin etkisini ölçmek için kullanılır. Gerçek pozitif, modelin doğru bir şekilde pozitif olarak sınıflandırdığı örneklerdir. Yanlış negatif ise modelin negatif olarak tahmin ettiği ancak gerçekte pozitif olan örneklerdir. Duyarlılık şu formül ile hesaplanır:

$$Duyarlılık = \frac{Gerçek\ Pozitifler}{Gerçek\ Pozitifler + Yanlış\ Negatifler} \quad (9)$$

3 Bulgular ve tartışma

Deneysel çalışmalar RTX 2080Ti i5 12400f işlemci ve 32 GB RAM'e sahip bir sistemle yürütülmüştür. Önerilen modelin etkinliği F1 skor, KüB, hatırlama, duyarlılık ve doğruluk metrikleriyle ölçülmüştür. Etiketlenmiş 313 panoramik radyografi görüntüsü 256x512 boyutuna getirilmiştir. Veri artırma uygulanmıştır. Verilerin %80'i eğitime %20'si teste ayrılmıştır. Veri kümesi FPN, PSPNet ve Unet kullanarak eğitilmiş ve test edilmiştir. Default olarak VGG16 omurga ağı ile gerçekleştirilen eğitim için elde edilen metrikler Tablo 1'de verilmiştir. 16 batch boyutu ile gerçekleştirilen eğitimde, başlangıç öğrenme oranı 0,0001 olarak belirlenmiştir. Eğitim süreci boyunca Adam optimizer kullanılmıştır ve eğitim 100 epoch boyunca sürdürülmüştür. Maksimum yığın boyutu, eğitim sırasında bellek yönetimi ve hesaplama verimliliği göz önünde bulundurularak optimize edilmiştir. Öğrenme oranı sabit tutulmuş ve herhangi bir öğrenme oranı azaltıcı (learning rate reducer) kullanılmamıştır. Model performansı her epoch sonunda doğrulama verileri ile değerlendirilmiş ve doğrulama doğruluğu ile eğitim kaybı izlenmiştir.

Tablo 1'de görüldüğü üzere, en iyi performansı UNet VGG16 ağı sağlamıştır. UNet VGG16 ile elde edilen F1 skoru 93.74, KüB 88.22, kesinlik 94.16, duyarlılık 93.32 ve doğruluk 98,25'tir. FPN VGG16 ağı da yüksek performans göstermiştir; F1 skoru %92,16, KüB %85.47, kesinlik %90,72, duyarlılık %93,65 ve doğruluk %97.76 olarak ölçülmüştür. PSPNet VGG16 ağı ise diğer iki modele göre

daha düşük performans sergilemiştir; F1 skoru %89.60, KüB %81.16, kesinlik %87.18, duyarlılık %92.16 ve doğruluk %97.00 olarak elde edilmiştir. Sonuçlar, UNet VGG16 ağının diğer modellere kıyasla daha üstün bir performans sergilediğini göstermektedir. UNet modelinin diğer modellere kıyasla daha yüksek performans sergilemesi çalışma devamında diğer omurga ağları ile kıyaslanması için UNet üzerinden devam edilmesine karar kılınmıştır.

UNet ağ modeli için farklı omurga ağları denenerek omurga ağlarının dış segmentasyonu problemi için performansları kıyaslanmıştır. Omurga ağı olarak EfficientNet, ResNet50, InceptionV3, DenseNet121 ve MobileNetV2 mimarileri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 2'deki gibidir

UNet EfficientNetb0, 93.91 gibi yüksek bir F1 skoru ve 95,34 duyarlılık değeri ile genel olarak çok güçlü bir performans sergilemiştir. Bu model, doğru pozitif ve doğru negatifleri oldukça iyi tanımlayarak duyarlılığı yüksek tutmuştur. Ayrıca, 88.52 Küçük Boyut (KüB) değeri ile diğer modellere göre biraz daha büyük boyutlu olsa da, performansı ile bu farkı dengelemektedir. UNet ResNet50, 93.85 F1 skoru ve 98.27 doğruluk değeri ile en yüksek doğruluk oranını elde etmiştir. Bu model, 93.73 kesinlik değeri ile doğru pozitif tahminlerinde yüksek isabet oranına sahiptir. ResNet50, genel doğruluk açısından en iyi performansı sergileyerek güvenilir bir model olduğunu göstermektedir.

UNet InceptionV3, 93.81 F1 skoru ve 88.35 KüB değeri ile öne çıkarken, 94.82 kesinlik değeri ile en yüksek kesinlik oranına sahiptir. Bu model, doğru pozitif tahminlerinde üstün başarı gösterirken, duyarlılık değeri 92.83 ile diğer modellere göre biraz daha düşüktür. Bu da modelin yanlış negatif tahminlere biraz daha açık olduğunu göstermektedir. UNet MobileNetV2, 93.79 F1 skoru ve 88.31 KüB değeri ile dengeli bir performans sergilemektedir. 93.35 kesinlik ve 94.24 duyarlılık değerleri ile hem doğru pozitif hem de doğru negatif tahminlerde iyi bir denge sağlamaktadır. MobileNetV2, hem kesinlik hem de duyarlılık açısından güvenilir bir modeldir. UNet VGG16, 93.74 F1 skoru ve 88.22 KüB değeri ile dikkat çekmektedir. Bu model, 94.16 kesinlik değeri ile doğru pozitif tahminlerinde yüksek isabet oranına sahip olup, 93.32 duyarlılık değeri ile doğru negatif tahminlerde de başarılıdır. VGG16, genel olarak dengeli ve yüksek performans sunarak diğer modeller arasında öne çıkmaktadır. UNet DenseNet121, 93.65 F1 skoru ve 88.06 KüB değeri ile en yüksek duyarlılık (95.36) değerine sahiptir. Bu model, doğru negatif tahminlerde oldukça başarılı olup, duyarlılığı yüksek tutarak yanlış negatif oranını minimize etmektedir. Ancak, 92.00 kesinlik değeri ile doğru pozitif tahminlerde diğer modellere nazaran biraz daha düşük performans sergilemektedir.

Genel değerlendirmede, EfficientNetb0 ve ResNet50, genel doğruluk ve F1 skoru açısından öne çıkarken, InceptionV3 ve DenseNet121 belirli ölçütlerde üstün performans göstermektedir. MobileNetV2 ve VGG16 ise dengeli performans sunarak hem kesinlik hem de duyarlılık açısından iyi sonuçlar elde etmişlerdir.

Tablo 1. UNet FPN ve PSPNet için elde edilen sonuçlar

Ağ Mimarisi	F1 Skor (%)	KüB (%)	Kesinlik (%)	Duyarlılık (%)	Doğruluk (%)
Unet VGG16	93.74	88.22	94.16	93.32	98.25
FPN VGG16	92.16	85.47	90.72	93.65	97.76
PSPNet VGG16	89.60	81.16	87.18	92.16	97.00

Tablo 2. Farklı omurga ağları için elde edilen sonuçlar

Kullanılan Omurga Ağı	F1 Skor (%)	KüB (%)	Kesinlik (%)	Duyarlılık (%)
Unet Efficientnetb0	93.91	88.52	92.52	95.34
Unet Resnet50	93.85	88.41	93.73	93.96
Unet İnceptionv3	93.81	88.35	94.82	92.83
Unet Mobilenetv2	93.79	88.31	93.35	94.24
Unet Vgg16	93.74	88.22	94.16	93.32
Unet Densenet121	93.65	88.06	92.00	95.36

4 Sonuçlar

Bu çalışma, panoramik radyografi görüntüleri üzerinde diş segmentasyonu için farklı segmentasyon modellerinin etkinliğini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Özellikle UNet, FPN ve PSPNet gibi derin öğrenme tabanlı mimarilerin performansları karşılaştırılmış ve her bir modelin doğruluk, hassasiyet ve F1 skoru gibi metrikler açısından analizi yapılmıştır. Kullanılan UNet, FPN ve PSPNet mimarileri arasında, özellikle UNet modeli VGG16 omurga ağı ile en yüksek segmentasyon doğruluğunu elde etmiştir. Bu sonuç, literatürdeki diğer çalışmalarda da sıkça vurgulanan UNet'in diş segmentasyonu için uygun bir model olduğunu doğrulamaktadır [26]. UNet modeli, EfficientNet, ResNet50, InceptionV3, DenseNet121 ve MobileNet gibi farklı omurga ağlarıyla yeniden eğitilmiş ve performansları karşılaştırılmıştır. Bu omurga ağlarının her biri, segmentasyon doğruluğu ve diğer değerlendirme metrikleri açısından farklı performans sergilemiştir. Özellikle EfficientNetb0 ve ResNet50, genel doğruluk ve F1 skoru açısından öne çıkarken, InceptionV3 ve DenseNet121 bazı metriklerde iyi bir performans göstermiştir. MobileNetv2 ve VGG16 ise dengeli bir performans sunarak hem kesinlik hem de duyarlılık açısından oldukça başarılı sonuçlar elde etmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, derin öğrenme tabanlı diş segmentasyonu modellerinin, el ile gerçekleştirilen segmentasyona kıyasla büyük bir zaman tasarrufu sağladığını ve yüksek doğrulukla çalıştığını göstermektedir. Ayrıca, kullanılan veri artırma teknikleri ve farklı omurga ağları ile yapılan denemeler, model performansını optimize etme konusunda önemli katkılar sağlamıştır. Bu çalışmada, özellikle veri kümesinin etiketleme sürecindeki dikkat ve titizlik, elde edilen yüksek performanslı sonuçların temelini oluşturmuştur. Ancak, çalışmanın bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Öncelikle, kullanılan veri kümesi belirli bir bölgeden ve belirli demografik özelliklere sahip hastalardan elde edilmiştir. Bu nedenle, model başarısını artırmak için daha geniş ve çeşitli veri kümelerinde denenebilir. Ayrıca, segmentasyon doğruluğunun artırılması için doğrudan diş segmentasyonu problemine özgü bir mimari tasarlanabilir.

Gelecek çalışmalar, farklı diş hastalıklarının ve anomalilerin otomatik tespiti ve sınıflandırılması için daha gelişmiş derin öğrenme modellerinin geliştirilmesine odaklanmalıdır. Ayrıca, modellerin etkinliği ve güvenilirliğini test etmek için bir diş hekimi ve derin

öğrenme modellerinin segmentasyon konusunda kıyaslanması gibi daha geniş kapsamlı deneyler de klinik ortamında yapılabilir. Sonuç olarak, derin öğrenme tabanlı segmentasyon teknikleri, diş hekimliği alanında erken teşhis ve tedavi planlamada önemli bir araç olarak gelecekteki çalışmalarda kullanılabilir ve bu alanda yapılan çalışmaların devamı, diş sağlığı hizmetlerinin kalitesini artırmaya yönelik önemli katkılar sağlayacaktır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %8

Kaynaklar

- [1] S.A. Gill, Quinonez R.B., M. Deutchman, C.E. Conklin, D. Rizzolo, D. Rabago, H. Silk. Integrating Oral Health into Health Professions School Curricula. Medical Education Online, 27 (1). 2022. <https://doi.org/10.1080/10872981.2022.2090308>.
- [2] Oral health: A window to your overall health - Mayo Clinic. (n.d.). Retrieved May 26, 2024, from <https://www.mayoclinic.org/healthy-lifestyle/adult-health/in-depth/dental/art-20047475>
- [3] WHO. Oral health. Retrieved December 25, 2023, from <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/oral-health>
- [4] R. Izzetti, , M. Nisi, G. Aringhieri, L. Crocetti, F. Graziani and C. Nardi. Basic knowledge and new advances in panoramic radiography imaging techniques: a narrative review on what dentists and radiologists should know. Applied Sciences, 11 (17), 7858. 2021. <https://doi.org/10.3390/AP11177858>
- [5] H. Zhang, and Y. Qie. Applying deep learning to medical imaging: a review. Applied Sciences 13 (18), 10521. 2023. <https://doi.org/10.3390/AP131810521>
- [6] A.B. Oktay, and A. Gurses. Detection, segmentation, and numbering of teeth in dental panoramic images with mask regions with convolutional neural network features. State of the Art in Neural Networks and Their Applications: 1, 73–90. 2021. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819740-0.00004-8>.
- [7] Y. Yang, R. Xie, W. Jia, Z. Chen, Y. Yang, L. Xie and B.X. Jiang. Accurate and automatic tooth image segmentation model with deep convolutional neural

- networks and level set method. *Neurocomputing*, 419, 108–125. 2021. <https://doi.org/10.1016/J.NEUCO.M.2020.07.110>
- [8] M.K. Alam, T. Haque, F. Akhter, H.N. Albagieh, A. Bin Nabhan, M.A. Alsenani, S. Islam. Teeth segmentation by optical radiographic images using VGG-16 deep learning convolution architecture with R-CNN network approach for biomedical sensing applications. *Optical and Quantum Electronics*, 55(9), 1–19. 2023. <https://doi.org/10.1007/S11082-023-05096-X/TABLES/4>.
- [9] G. Rubiu, M. Bologna, M. Cellina, M. Cè, D. Sala, R. Pagani, ... M. Ali. Teeth segmentation in panoramic dental x-ray using mask regional convolutional neural network. *Applied Sciences* 2023, Vol. 13, Page 7947, 13 (13), 7947. 2023. <https://doi.org/10.3390/APP13137947>.
- [10] M. Xu, Y. Wu, Z. Xu, P. Ding, H. Bai and X. Deng. Robust automated teeth identification from dental radiographs using deep learning. *Journal of Dentistry*, 136, 104607. 2023. <https://doi.org/10.1016/J.JDEN.T.2023.104607>.
- [11] Prados-Privado, M., J. García Villalón, A. Blázquez Torres, C.H. Martínez-Martínez and C. Ivorra. A convolutional neural network for automatic tooth numbering in panoramic images. *BioMed Research International*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/3625386>.
- [12] A.E. Yüksel, S. Gültekin, E. Simsar, Ş.D. Özdemir, M. Gündoğar, S.B. Tokgöz and İ.E. Hamamcı. Dental enumeration and multiple treatment detection on panoramic X-rays using deep learning. *Scientific Reports*, 11(1), 1–10. 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90386-1>
- [13] S.Y. Lin, and H.Y. Chang. Tooth numbering and condition recognition on dental panoramic radiograph images using CNNs. *IEEE Access*, 9, 166008–166026. 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCE.SS.2021.3136026>.
- [14] S. Tian, N. Dai, B. Zhang, F. Yuan, Q. Yu and X. Cheng. Automatic classification and segmentation of teeth on 3D dental model using hierarchical deep learning networks. *IEEE Access*, 7, 84817–84828. 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2924262>.
- [15] A. Jana, H.M. Subhash and D. Metaxas. Automatic tooth segmentation from 3D dental model using deep learning: a quantitative analysis of what can be learnt from a single 3D dental model, 12567, 42–51. 2023. <https://doi.org/10.1117/12.2669716>.
- [16] H. Wang, J. Minnema, K.J. Batenburg, T. Forouzanfar, F.J. Hu and G. Wu. Multiclass CBCT image segmentation for orthodontics with deep learning. *Journal of Dental Research*, 100 (9), 943–949. 2021. <https://doi.org/10.1177/00220345211005338>.
- [17] C. Szegedy, V. Vanhoucke, S. Ioffe, J. Shlens and Z. Wojna. Rethinking the inception architecture for Computer Vision. 2016.
- [18] K. He, X. Zhang, S. Ren and J. Sun. Deep residual learning for image recognition. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 770–778. 2015. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90>.
- [19] C. Szegedy, V. Vanhoucke, S. Ioffe, J. Shlens and Z. Wojna. Rethinking the inception architecture for computer vision. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2818–2826. 2016. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.308>.
- [20] G. Huang, Z. Liu, L. Van Der Maaten and K.Q. Weinberger. Densely connected convolutional networks. *Proceedings - 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2261–2269*. 2017. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.243>
- [21] M. Sandler, A. Howard, M. Zhu, A. Zhmoginov and L.C. Chen. MobileNetV2: Inverted residuals and linear bottlenecks. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 4510–4520. 2018. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00474>
- [22] T.Y. Lin, P. Dollár, R. Girshick, K. He, B. Hariharan and S. Belongie. Feature pyramid networks for object detection. 2016. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/1612.03144v2>
- [23] H. Zhao, J. Shi, X. Qi, X. Wang and J. Jia. Pyramid scene parsing network. *proceedings - 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR*, 6230–6239. 2017. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.660>.
- [24] O. Ronneberger, P. Fischer and T. Brox. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 9351, 234–241. 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28/COVER.
- [25] K. Simonyan, and A. Zisserman. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *3rd International Conference on Learning Representations, ICLR 2015 - Conference Track Proceedings*. Retrieved from, 2014. <https://arxiv.org/abs/1409.1556v6>
- [26] K. Becker, É. Da, S. Rocha and P.T. Endo. A comparative study of deep learning models for dental segmentation in panoramic radiograph. *Applied Sciences* 12 (6), 3103. 2022. <https://doi.org/10.3390/APP12063103>





Sert kabuklu araç üstü kamp çadırının aerodinamik tasarımı ve analizi

Aerodynamic design and analysis of a hard-shell rooftop camping tent

Özkan Özmen^{1,*}, Mümin Özden²

¹ Erciyes Üniversitesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, 38030, Kayseri, Türkiye

² Sateksan Makine Sanayi A.Ş., Melikgazi Organize Sanayi Bölgesi, 38070, Kayseri, Türkiye

Öz

Kampçılar, araçlarını ve çadırlarını tek bir yerde bulabildikleri için araç üstü çadırlar, ikili bir amaca hizmet eden önemli bir ürün haline gelmiştir. Sert kabuklu araç üstü çadırların tasarımında en önemli parametrelerden birisi aerodinamik bir geometriye sahip olmasıdır. Araçlar için kullanılacak bu tür dış ekipmanlar, yoldaki sürtünmeyi azaltarak, daha sessiz, pürüzsüz, verimli ve genel olarak güvenli bir sürüş sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır. Böylece yakıt verimliliğinin sağlanmasının yanında aracın konfor ve performansına da olumlu yönde katkı sağlayacağı açıktır. Bu gereksinimler dikkate alınarak bu çalışmada NACA 0021 geometrisi temelinde sert kabuklu araç üstü çadırın, tasarım geometrisi (Model M) oluşturulmuştur. Model M'nin aerodinamik performansı, Ansys Fluent hesaplamalı akışkanlar dinamiği paket programı ile analiz edilmiştir. Ayrıca, ticari bir araç üstü çadır modeli ile aynı analizler gerçekleştirilmiş ve aerodinamik performansları karşılaştırılmıştır. Model M'nin ticari modele göre ortalama %86.31 daha az sürüklenme kuvveti ve %13.20 daha az basma kuvveti oluşturduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Sert kabuklu araç üstü çadır, Aerodinamik tasarım, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği

1 Giriş

Gelişen bir turizm sektörü olarak kamp özellikle koronavirüs krizinden sonra popüler bir faaliyet olarak geceyi güzel bir ortamda, doğaya yakın bir yerde geçirilen açık hava ağırlama endüstrisinin bir parçası olarak tanımlanır. Özellikle Orta Asya'da binlerce yıldır insanlar barınma ihtiyacını giderebilmesi için çadırlarda yaşamalarına rağmen günümüzde açık havada geçici olarak ikamet edilen bir eğlence etkinliği olarak devam etmektedir. Son yıllarda ise kampçılık endüstrisinde gözle görülür değişimlerin gerçekleşmesiyle birçok farklı özellikte kamp konaklama türleri ortaya çıkmıştır [1, 2]. Bunlar, genel olarak Tablo 1'deki gibi sınıflandırılabilir [3].

Farklı kamp türleri için üretilen ekipmanlar ise sürekli büyüyen bir pazardır. Fortune Business Insights'ın, kamp ekipmanları hakkında yayınladığı rapora göre, global kamp ekipmanları büyüklüğü 2023 yılında 83 milyar \$ olarak değerlendirilirken 2024 yılında 89.81 milyar \$'dan 2032 yılına kadar 172.21 milyar \$'a yükselmesi öngörülmüştür [4].

Abstract

Since campers can find their vehicles and tents in one place, rooftop tents have become an important product that serves a dual purpose. One of the most critical parameters in the design of hard-shell rooftop tents is their aerodynamic geometry. Such external vehicle equipment should be designed to reduce road friction, providing a quieter, smoother, and safer ride, while also improving efficiency. Thus, it is clear that in addition to providing fuel efficiency, it will also contribute positively to the comfort and performance of the vehicle. In this study, considering these requirements, the design geometry (called Model M) of the hard-shell rooftop tent was based on the NACA 0021 geometry. Model M's aerodynamic performance was then analyzed using Ansys Fluent computational fluid dynamics programs. In addition, the same analyses were performed on a commercial hard-shell rooftop tent model (Commercial Model), and their aerodynamic performances were compared. It was found that Model M produced an average of 86.31% less drag force and 13.20% less downforce than the commercial model.

Keywords: Hard-shell rooftop tent, Aerodynamic design, Computational fluid dynamics

Tablo 1. Kamp konaklama türleri [3]

Çadırlar		
Bez Çadırlar	Çekme Çadırlar	
Araç Üstü Çadırlar	Diğerleri	
Çekme Karavan		
Karavanlar	Katlanır Karavanlar	
Moto-Karavan		
Motorlu Karavanlar	Araba Kampları	
Taşınabilir Sabit Konaklama		
Küçük Evler	Sabit Karavanlar	Yüzen Evler
Taşınamaz Sabit Konaklama		
Yazlıklar	Barakalar	
Kulübeler	Varil Kampları	

Kamp ekipmanları pazarını yönlendiren ilk üç etken ise: Online perakende satış formatlarının sosyal platformlarda bulunması

Araç üstü çadırlar hakkında farkındalığın artması

Kamp programlarındaki çeşitliliğin artması olarak belirtilmiştir [5].

Araç üstü çadır (AÜÇ)'ler, kampçılarının karşılaştığı lojistik zorlukları azaltarak, çadırların kurulması için güvenli

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ozmen@erciyes.edu.tr (Ö. Özmen)

Geliş / Received: 02.08.2024 Kabul / Accepted: 27.08.2024 Yayımlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1527130

bir yer bulma konusundaki kısıtlamayı çözmektedir. Bu kamp türü temizlik, konfor ve basit bir kurulum süreci gibi birçok lüks sunmaktadır. Yumuşak kabuklu çadırlar ve sert kabuklu çadırlar olmak üzere AÜÇ'lerin Şekil 1'de gösterildiği gibi iki ana tipi vardır [6].

Yumuşak kabuklu araç üstü çadır (YKAÜÇ), genellikle kalınlığı modelden modele değişen yırtılmaz kumaştan yapılmış, zemin çadırına benzeyen tipleridir. Bunun yanında havalı şişme yatak tarzı, bir kompresör yardımıyla şişirilen modeller de mevcuttur.

Sert kabuklu araç üstü çadır (SKAÜÇ), ise cam elyafından (fiberglas), akrilonitril bütadiyen stiren (ABS) veya alüminyumdan yapılmış sert bir dış kabuğa sahip olan modellerdir.



(a)



(b)

Şekil 1. Araç üstü çadırlar (a) Yumuşak kabuklu (b) Sert kabuklu [6]

AÜÇ'lerin, yer çadırlarına göre çok daha hızlı kurulumlarının yapılabilir olmasının yanında geleneksel bir çadırdan daha iyi rüzgâr, kar, yağmur koruması ve toprağın, zeminin veya çimin neminden koruma özellikleri vardır. Ayrıca kampçılara, toprak üzerindeki tehlikeli hayvanlardan veya yılanlar ve örümcekler gibi istenmeyen böceklerden uzak tutarlar. Bu esneklik, bireylerin engebeli arazilerden kentsel ortamlara kadar çeşitli ortamlarda kamp yapmasına olanak tanıyarak farklı tercihlere ve ihtiyaçlara göre tasarlanmış benzersiz bir kamp deneyimi sunar [7].

Geleneksel bir yer çadırı kadar kir veya kum toplamamaları, kampçılara daha temiz bir ortam sağlamanın yanında kurmak için düz bir zemine ihtiyaç duymamaları da ayrı bir avantajdır. Bir karavan ile karşılaştırıldığında ise karavana göre ucuz fiyatıyla ön plana çıkmakta olan AÜÇ'lerin popülaritesi her geçen gün artmaktadır [8].

Tablo 2'de SKAÜÇ ile YKAÜÇ'lerin genel bir kıyaslaması yapılmıştır. SKAÜÇ'ler malzemelerinden dolayı suya karşı daha dayanıklı ve YKAÜÇ'lara göre daha uzun ömürlü olma eğilimindedir. Bunun yanında daha iyi bir aerodinamik bir şekle sahip olduklarından yakıt tasarrufu sağlayarak araç üzerinde daha az sürüklenme kuvveti oluştururlar. Fakat YKAÜÇ'lara göre daha ağırlıdır. SKAÜÇ'ler 30 sn gibi çok kısa bir açılma/kapanma süresine sahipken çoğu YKAÜÇ'ler ise bir yer çadırı gibi araç üzerinde profesyonel kurulum gerektirmektedir. SKAÜÇ'lerin bakımı çok daha basittir. Kirilenmesi durumunda kabuk su ile rahatlıkla temizlenirken YKAÜÇ'lerin temizlenmesi için kumaşın sökülüp yıkanması gerekir.

Tablo 2. Araç üstü çadır türlerinin karşılaştırılması [6]

Araç Üstü Çadırlar	Sert Kabuklu	Yumuşak Kabuklu
Fiyat	★★★	★★★★
Ağırlık	★★★	★★★★
Açılıp-Kapanma	★★★★★	★★
Konfor	★★★★	★★★★★
Dayanıklılık	★★★★★	★★★★
Mevsimsellik	★★★★	★★★★

Yukarıda bahsedilen AÜÇ'lerin her iki türü de hatchback, sedan, station wagon, suv gibi araç tiplerinin herhangi birinde rahatlıkla kullanılabilir. Burada sınırlayıcı, araçların taşıyabilecekleri tavan ağırlık limitleridir ki bu ekstra ağırlık da (50-100 kg) araçların toplam ağırlığını artırır. Araçlarda her 100 kg'lık bir ağırlığın 100 km'lik bir mesafede yakıtı sırasıyla ortalama olarak benzinli araçlar için 0.2 - 0.4 L ve dizel araçlar için 0.15 - 0.3 L arasında artırdığı bilinmektedir [9]. Bunun yanında AÜÇ'lerin bazı modellerinin aerodinamik tasarımdan yoksun olmaları fazladan yakıt tüketimine sebebiyet vererek, yanlış geometrik tasarımın, araç tavanı ve süspansiyonlar da dâhil olmak üzere birçok mekanik parçayı olumsuz yönde etkileme potansiyeline sahiptir [6].

Yakıt tüketimini, dolayısıyla sera gazı kirliliğini azaltmak için ise daha verimli araçlara olan talepler otomobil üreticilerini, enerji tüketimini azaltma yarışına içerisine yönlendirmiştir. Otomobillerde enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik tedbirlerin başında [9];

Yakıt ve yanma verimliliğinin artırılması (içten yanmalı motorlu araçlar için),

Araç ağırlığının azaltılması,

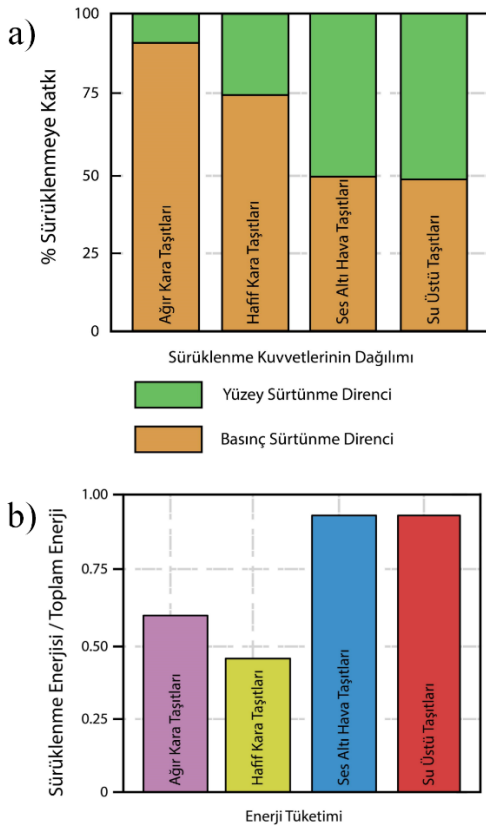
Yuvarlanma ve aerodinamik direncin azaltılması,

Hareketli elemanlarda sürtünmenin azaltılması gelmektedir.

Araç motorlarından elde edilen gücün çoğunluğu, aerodinamik sürüklenmenin (%53) ve yuvarlanma direncinin (%32) üstesinden gelmek için kullanılır; bu gücün yardımcı ekipmanlar için yalnızca %9'u ve aktarma organları tarafından ise %6'sı kullanılır. 88.5 km/s hızla

hareket eden bir araç için aerodinamik sürtünmedeki %15 oranında bir azalma, yakıt tasarrufunda yaklaşık %5-7 arasında bir tasarruf sağlamaktadır [10].

Araçlar için yeni bir dış ekipman tasarlanması istendiğinde, verimlilik açısından gerek düşük ağırlık ihtiyaçları gerekse aerodinamik çalışma özelliklerinin iyi bilinmesi ve dikkate alınması gerekir. Otomotiv endüstrisinde araçların enerji tüketiminin azaltılması ve çevresel etkileri nedeniyle, araştırmacılar, motorların optimizasyonu ve hafif malzemelerin kullanılmasından sonra odaklandığı en önemli konulardan birisi aerodinamik tasarım olmuştur. Otomobil aerodinamiği araştırmasının ana amacı ise aerodinamik sürüklenmeyi azaltmak için dış akışları analiz ve kontrol ederek yakıt verimliliğini artırmaktır. Aerodinamik sürüklenme, yüzey viskoz sürtünme direnci ve basınç direnci olarak iki şekilde gerçekleşir. Akış ayrımı sebebiyle araçlar üzerindeki basınç direnci, toplam aerodinamik sürüklenmenin %80'inden fazlasını oluştururken, geri kalan %20'lik kısmı ise viskoz sürtünme direncinden oluşur (Şekil 2). Sonuç olarak aerodinamik sürüklenmenin ana nedeni basınç direncinden kaynaklanır. Akış ayrımı, tekerlek çevresinde, tabanda, ön ve arka camların her iki yanında ve tabanda olmak üzere bir aracın çevresinde tüm bölgelerde gerçekleşir. Özellikle arka camda ve tabandaki basınç direnci, tüm bölgelerdeki basınç direncinin %90'ına karşılık gelir ve bu direncin %80'i de arka kısımda oluşur. Bundan dolayı akış ayrımını engelleyerek veya etkilerini azaltarak aerodinamik performansın önemli ölçüde artırılabilirdiği gözlemlenmiştir [11, 12].

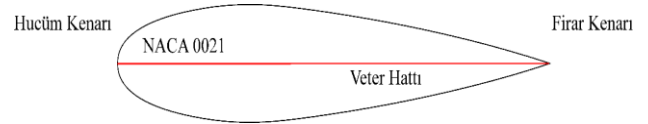


Şekil 2. Aerodinamik (a) sürüklenme kuvvetlerinin dağılımı (b) enerji tüketimi [12]

Araçların tavanına montajı yapılan AÜÇ'ler, araçta oluşturduğu ekstra ağırlığın ve etkisiz bir aerodinamik geometriye sahip olmanın, yakıt oranlarının artmasına yol açan aşırı sürtünmeyle sonuçlanacağı açıkça görülmektedir. Bu nedenle, iyi bir tasarım ile aerodinamik sürüklenmenin azaltılması, yakıt verimliliğinin sağlanması ve pazarda güçlü bir rekabet avantajı için kaçınılmazdır.

2 Materyal ve metot

Kanat profilleri, hava araçlarında kullanılan ve akışkanın üzerinden sorunsuz bir şekilde akmasına yardımcı olan eşsiz geometrilerdir [13]. Bu yapılar kuşların kanatlarından esinlenilmiş ve yapılan deneysel/nümerik analizler sonucunda geliştirilmişlerdir [14, 15]. Bu profillerin temelinde iki çeşidi vardır. Bunlar; kambur ve simetrik kanatlardır. Simetrik kanatlar, alt ve üst yüzeylerinde 0° hücum açısında neredeyse eşit taşıma kuvveti oluştururlar. Reynolds sayısına ve hücum açısına bağlı olarak taşıma kuvveti değerleri değişir. Hücum açısının 0° dışındaki durumlarda kayda değer taşıma kuvveti oluşturabilirler. Bu yapılar gösteri uçuşu yapan uçaklar gibi, özel durumlarda kullanılırlar. Ayrıca günümüzde popülerliği artan elektrikli araçların tasarımlarında da simetrik kanat profilleri kullanılmaktadır. Bu profiller, yer yer aracın komple geometrisine [16] hâkim olur iken bazı durumlarda da araç ön havalandırma mazgalları, yan aynalar [17], antenler gibi komponentlerin tasarımlarını da etkilemişlerdir [17]. Kambur kanat profilleri ise her hücum açısında taşıma kuvveti üretebilen ve havacılık ile birlikte birçok alanda kullanılan yapılardır. Bu yapıların şekline, araçların spoilerinde ve birçok aerodinamik komponentinde rastlayabiliriz [18]. Bu çalışmada, Şekil 3'te gösterilen NACA 0021 serisi kullanılmıştır.



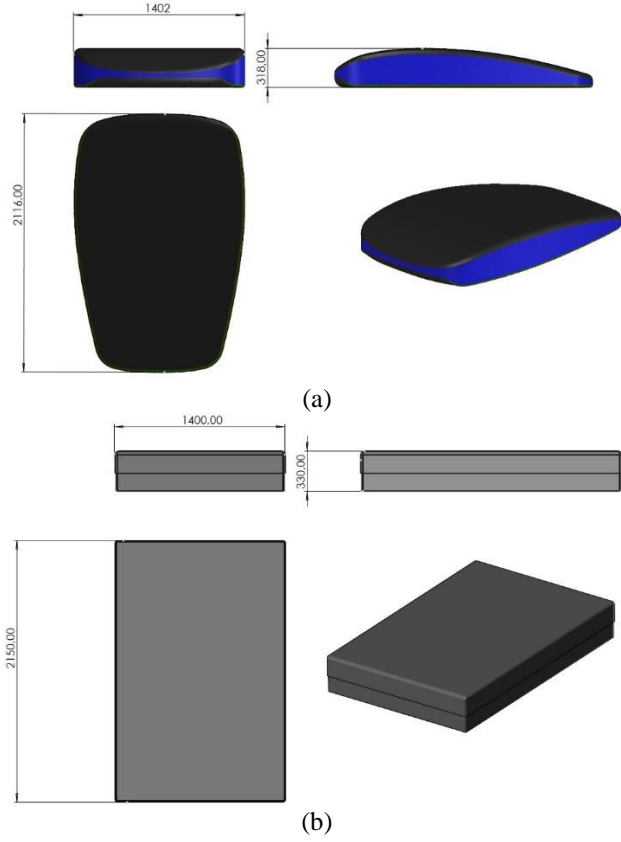
Şekil 3. NACA 0021 simetrik kanat profili

Kanat profillerinin numaraları, kanat profilinin özelliği hakkında bilgi vermektedir. Simetrik kanatların ilk iki rakamı sıfır olur ve son iki rakamda maksimum kalınlığı, veter yüzdesi olarak vermektedir. Bu kanat profili diğerlerine göre oldukça büyük kamburluğa sahiptir. Bu şekilde seçilmesinin sebebi, AÜÇ tasarımında yeterli alanın oluşturulmasıdır. Kanat profili, veter hattından kesilmiştir ve çadıra üst görünüşten bakılırsa tasarımının kenar kısımları, profilin alt ve üst çizgilerinden oluşturulmuştur. Bu sayede aracın dengesi korunacaktır [19]. Aynı şekilde, profilin bir kenarı kullanılarak çadırın yan görünüşüne bakıldığında, çadırın üst kısmın çizgisi belirlenmiştir. Tasarım sayesinde aracın tam dengede hareketi planlanmıştır.

2.1 Bilgisayar destekli tasarım modeli

NACA 0021 kanat profili temel alınarak yapılan tasarım Şekil 4a'da geometrik ölçütleri ile verilmiştir. Ayrıca, ticari olarak piyasada mevcut olan Bundutech [20] modelinin tasarım geometrisi de karşılaştırma amacıyla analizde

kullanılmıştır. Ticari modelin üç boyutlu bilgisayar destekli tasarım (3D CAD) verisi, blueprint tekniğiyle elde edilmiştir (Şekil 4b).



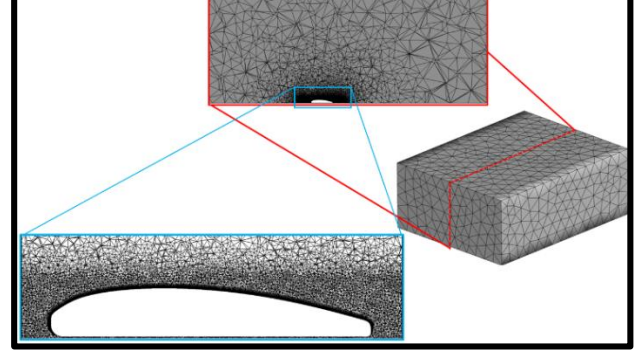
Şekil 4. Sert kabuklu araç üstü çadırın teknik resim ve ölçüleri (a) Model M (b) Ticari Model

2.2 Sayısal yöntem

ANSYS Fluent, yıllar boyunca sürekli olarak geliştirilen ve çok çeşitli uygulamalar için güçlü çözümler sunan köklü bir CFD yazılımıdır [21]. Analizler için iki farklı geometri oluşturulmuş ve bu geometriler CFD yazılımının gerekliliklerine göre hazırlanmıştır. Burada gereklilik, dış akış ismi verilen akış alanının oluşturulması ve sınır şartlarının belirlenmesidir [22]. Havacılık, enerji ve otomotiv sektöründe dış akış alanı oluşturularak çözümler yapılmaktadır [23].

Akış alanı, 3D analizler için genel olarak dikdörtgen prizması şeklinde bir hacmin içerisinde, analizi yapılacak geometrinin çıkarılmasıyla oluşturulur [24]. Oluşturulan hacim içerisinde analiz yapılacak geometrinin çıkarılması, aslında geometrinin olduğu kısımda bir boşluk oluşturulması demektir. Bu sayede yazılım, analiz yapılacak geometrinin yüzeylerini akışkanın önüne çıkan engeller olarak tanımlar. Bu sayede akışkana şekil ve yön verir. Bu işlemin yapılabilmesi için ağ yapısı adı verilen özel bir geometrik düzen oluşturulur. ANSYS, ağ yapısı oluşturmak için oldukça fazla seçenek sunmaktadır. Ağ yapıları, tetrahedral, hexahedral ve prizmatik gibi şekillerden oluşur ve her birinin kendi avantajları vardır [25]. Bu çalışma için, geometrimiz üzerindeki eğimli yüzeyleri en iyi şekilde kapsayacak tetrahedral ağ yapısı seçilmiştir. Şekil 5'te XY düzleminde

ANSYS içerisinde oluşturulan ağ yapısı detayları görselleştirilmiştir. Analiz yapılan geometrinin boyunun, her yöne 5 katı olacak mesafe ve arka kısımda girdap dökümlerini incelemek için 10 kat olacak şekilde tasarlanmış bir akış alanı kullanılmıştır.



Şekil 5. Analiz için ağ yapısı görseli

Bu çalışmada, Transition SST türbülans modeli kullanılmıştır. Bu türbülans modeli ANSYS tarafından SST türbülans modeline ekstra denklem ve parametreler eklenerek oluşturulmuştur. Adında yer alan transition kısmı ise, çözülmesi en zor olan geçiş (transition) bölgesine atfen yapılmıştır. Bu model oldukça başarılı sonuçlar veren bir RANS modelidir. Bu türbülans modeli için y^+ değeri 1'den aşağı olmalıdır [26]. CFD simülasyonlarında elde edilen sonuçların doğruluğunu ve güvenilirliğini sağlamak için ağ bağımsızlığı çalışmaları esastır. Bu çalışmalar, hesaplama kaynaklarını en aza indirirken tutarlı sonuçlar sağlayan uygun ağ boyutunu belirlemek için ağ yapısının değiştirilmesini içerir. Oluşturulan her bir milyon ağ yapısı için 1GB RAM kapasitesi ihtiyacı oluşmaktadır [27]. Tablo 3'te her iki model için de yapılan ağdan bağımsızlık çalışması sürüklenme kuvveti (drag force) ve basma kuvveti (down force) için sunulmuştur. Görüldüğü üzere 8×10^6 ve üzerindeki ağ yapılarında değişimin binde bir seviyesine düştüğü görülmüştür. Bu oran oldukça iyidir ve 8×10^6 üzerinde ağ yapısı oluşturmak çözüm sürelerini gereksiz uzatacaktır. Bu sebeple analizlere bu sayı ile devam edilmiştir.

Tablo 3. CFD analizi için ağ bağımsızlığı

Mesh Sayısı	Model M		Ticari Model	
	Sürüklenme Kuvveti	Basma Kuvveti	Sürüklenme Kuvveti	Basma Kuvveti
1×10^6	4.56	20.52	35.41	22.38
8×10^6	4.88	19.80	39.97	19.25
10×10^6	4.88	19.80	39.97	19.25
15×10^6	4.88	19.80	39.97	19.25

3 Bulgular

ANSYS Fluent yazılımından hem kontur görselleri hem de aerodinamik kuvvet sonuçları elde edilmiştir. Hem ticari model hem de aerodinamik olarak geliştirilmiş Model M sonuçları ayrı ayrı sunulmuştur. Tablo 4'te görüleceği gibi farklı hız değerleri için sürüklenme kuvveti ve basma kuvveti değerleri verilmektedir. Sonuçlar göstermiştir ki aerodinamik olarak geliştirmeler yapılan Model M'nin,

yapısı itibarıyla ticari modele göre oldukça düşük sürüklenme kuvveti değerleri verdiği görülmektedir. Bunun sebebi, ticari modelin köşeli bir yapıya sahip olması ve aracın üzerinde akışkan hareketinin durmasına neden olmasıdır. Model M ise aerodinamik bir yapıya sahip olması nedeniyle akışın yapı üzerinden kolayca akıp uzaklaşmasına izin vermektedir. Bu sayede akışkan, çadır üzerinde daha az sürüklenme kuvveti oluşturmaktadır.

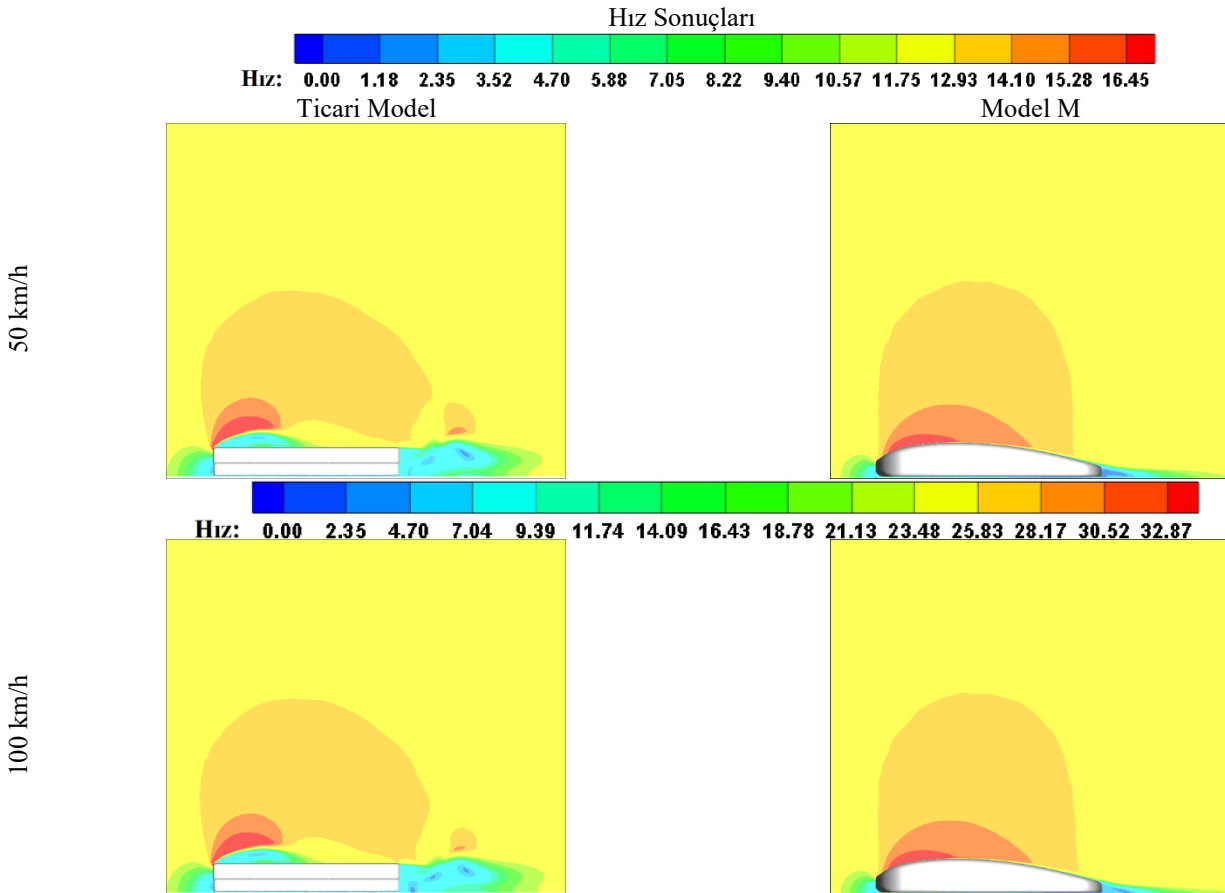
Tablo 4. Model M ve Ticari Modelin sürüklenme kuvveti ve basma kuvvetleri değerleri

HIZ		Model M		Ticari Model	
Hız (km/h)	Hız (m/s)	Basma Kuvveti	Sürüklenme Kuvveti	Basma Kuvveti	Sürüklenme Kuvveti
50	13.88	53.67	5.49	62.63	41.16
60	16.66	73.86	7.82	88.97	59.07
70	19.44	103.84	11.03	116.77	79.89
80	22.22	134.44	14.52	148.33	103.79
90	25.00	164.93	18.25	176.43	130.88
100	27.77	195.60	22.56	213.23	160.63
110	30.55	227.82	26.84	256.43	199.02
120	33.33	259.38	31.55	300.24	228.80
130	36.11	296.53	36.82	347.98	267.94
140	38.88	323.07	42.14	391.13	309.68
150	41.66	352.60	47.98	450.40	352.77

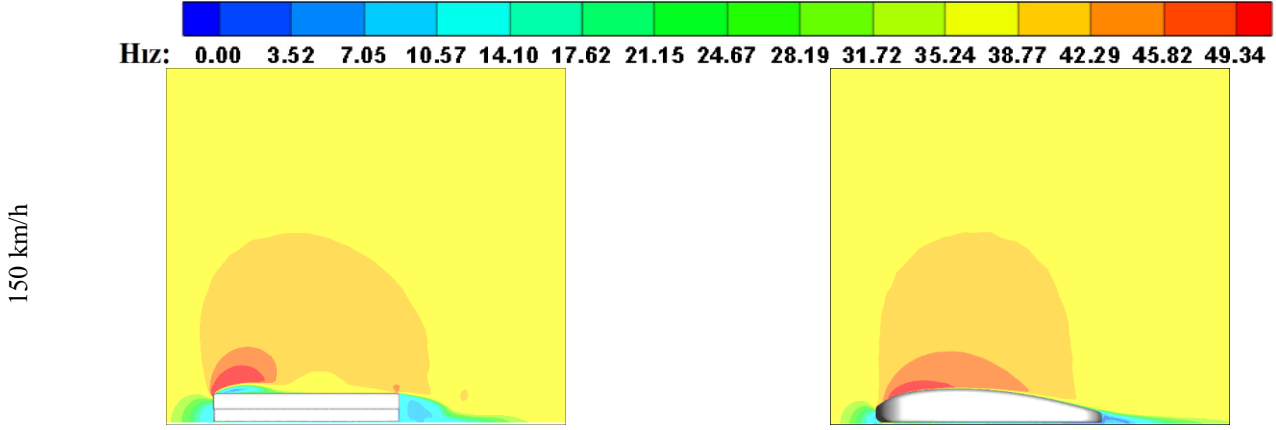
Diğer bir parametre ise aracın yere basması için oluşan basma kuvvetidir. Bu kuvvet sayesinde araç yolda daha iyi tutunmakta ve manevra durumlarında kontrolü kaybetmesine engel olmaktadır. Model M, simetrik kanat

profili yapısından faydalanılarak tasarlanmıştır. Bu yapı sayesinde çadırın üstten görünümü incelendiğinde her iki taraf için de benzer aerodinamik kıvrımlar olduğu görülmektedir. Simetrik kanat profillerinin özellikleri, 0° hücum açısında taşıma kuvveti oluşturmazlar. Bunun anlamı, SKAÜÇ'in araç üzerinde sağ ve sol kısımlarında aerodinamik denge oluşmasıdır. Çadırın yandan görünümü incelendiğinde ise yine simetrik profilin kesilerek bir tasarım oluşturulduğu görülmektedir. Bu profil sayesinde SKAÜÇ, araç üzerinde ekstra kuvvet oluşturarak yere daha iyi tutunmasını sağlamıştır.

Şekil 6'da SKAÜÇ'ların orta kısmından alınan kesitte hız görselleştirilmiştir. Akışkan soldan sağa doğru hareket etmektedir ve SKAÜÇ'in ön kısmı sol taraftadır. İlk olarak hız görsellerini incelediğimizde Model M üzerinde üst kısımda yüksek hız değerinin daha büyük bir alana sahip olduğu görülmektedir. Burada hız görselinde odaklanmamız gereken kısım ticari modelin ön kısmında oluşan düşük hız bölgesidir. Görsellerde ticari çadırın ön üst kısmında düşük hız bölgesi görülmektedir. Bu değer bizlere, o bölgede akış ayrılması olduğunu göstermektedir. Akış ayrılmaları yapılar üzerinde stabilizasyonu bozmakta ve yapıya fiziksel olarak zarar vermektedir. Akış ayrılmaları akım çizgileri görselleri üzerinde detaylı tartışılacaktır. Model M üzerindeki hız dağılımı incelendiğinde ise herhangi bir düşük hız bölgesi görülmemekle birlikte dağılım oldukça dengelidir. Bu denge kanat profili yapısı sayesinde sağlanmaktadır.



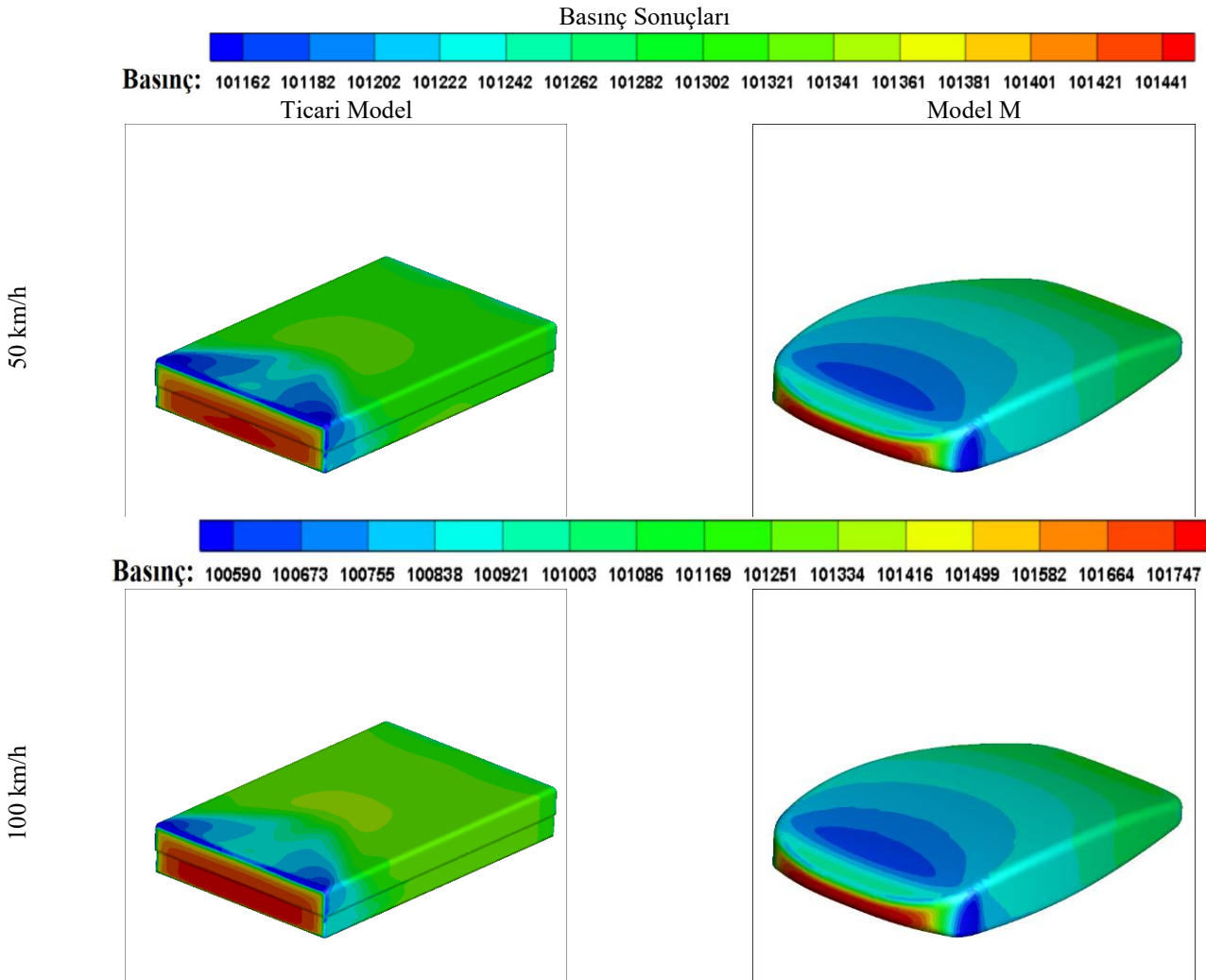
Şekil 6. Çadırların orta düzleminde elde edilen hız görselleri



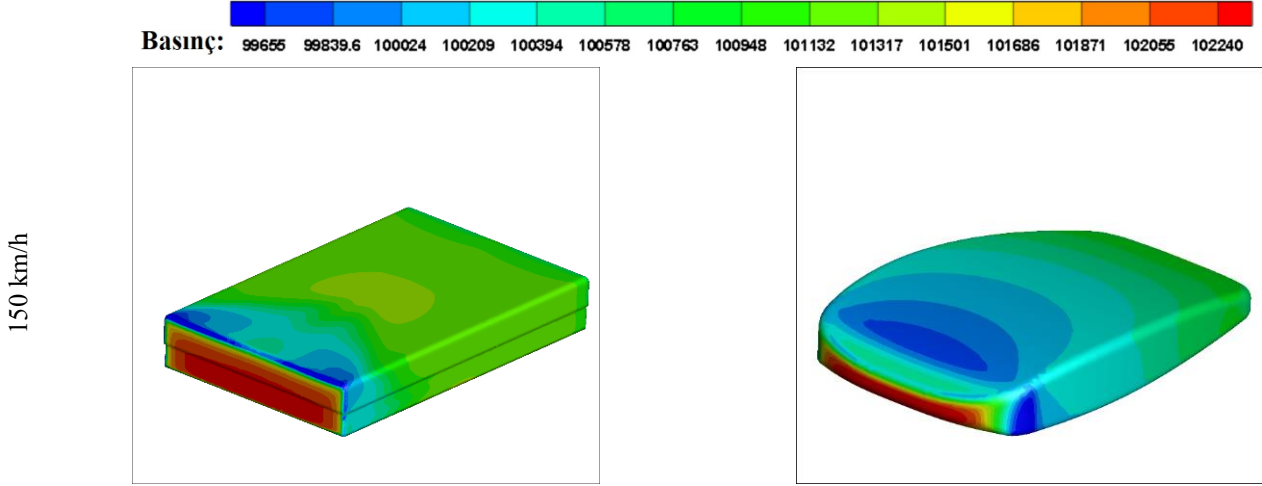
Şekil 6 (Devamı). Çadırların orta düzleminde elde edilen hız görselleri

Şekil 7’de ise çadır geometrisi üzerinde basınç görselleri sunulmuştur. Bu görsellerde, yüksek basınç bölgesinin bize durma noktalarını (stagnation point) gösterdiğini söyleyebiliriz. Bu tasarımlara benzer geometrilere durma noktalarının geniş bir alana yayılması, akışkanın hareket etmekteki zorluğunu bize göstermektedir. Ticari modelin ön

kısımında durma noktası alanının oldukça azaldığı görülmektedir. Bu azalma, bizlere pozitif yönde dönüş sağlamaktadır. Bu sonuçları ayrıca Tablo 4’deki aerodinamik kuvvet sonuçlarında da net olarak görebilmekteyiz.



Şekil 7. Çadırların yüzeylerinden elde edilen basınç görselleri

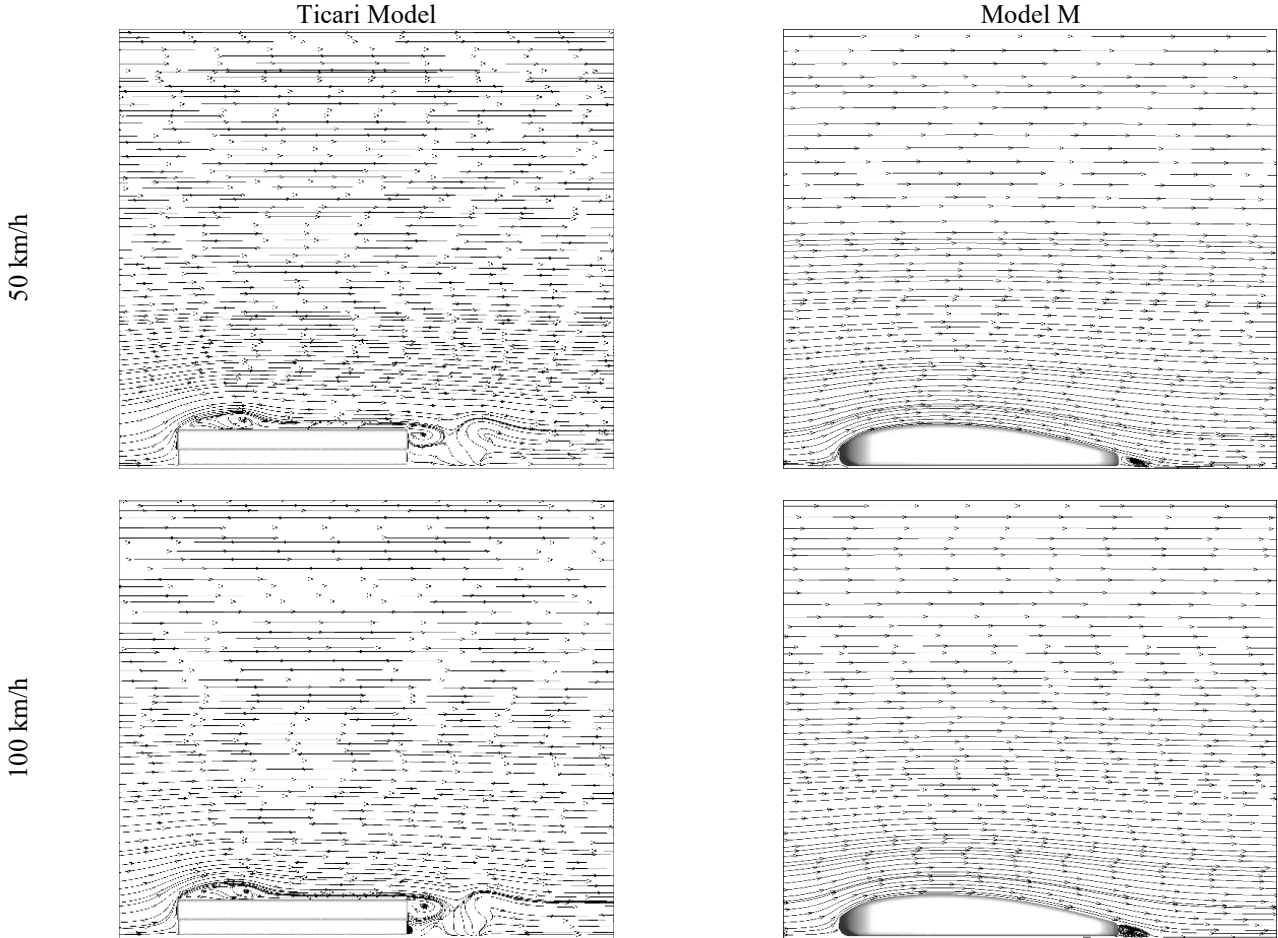


Şekil 7 (Devamı). Çadırların yüzeylerinden elde edilen basınç görselleri

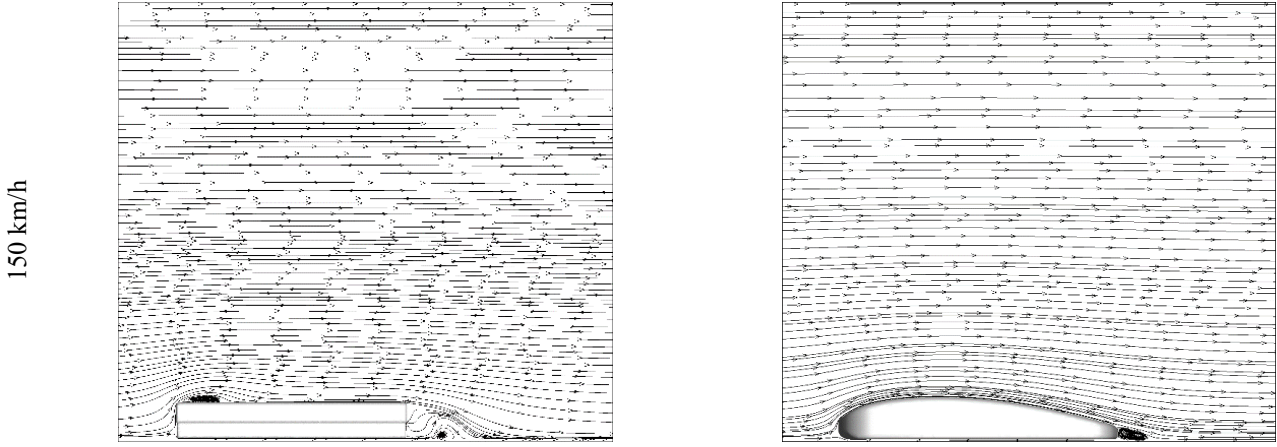
Şekil 8'de akım çizgilerinin (streamline) görselleri verilmiştir. Basınç sonuçlarında bahsedildiği gibi ticari modelin ön üst kısmında ayrılma noktaları oluşmuştur. Bu ayrılma noktaları stabilizasyonu bozmakta ve aerodinamik performansı düşürmektedir. Model M üzerinde bu şekilde bir oluşum olmadığı görülmekle birlikte, akışın çadır üzerinde yumulu bir şekilde aktığı ve çadırı terk ettiği görülmektedir.

Ticari modelin arka kısmında akışın bozularak çadırı terk ettiği görülmektedir. Bu bozulmaların yüksek miktarda olması, çok fazla girdap (türbülans) oluşumu anlamına gelmektedir. Oluşan bu girdaplar hem çadıra hem de araca çarparak aracın dengesinde bozulmalar oluşturmaktadır. Model M'de ise akışın, SKAÜÇ'ı aerodinamik olarak daha düzgün terk ettiği görülmektedir.

Akım Çizgileri Görselleri



Şekil 8. Çadırların orta düzleminde elde edilen akım çizgilerinin görselleri



Şekil 8 (Devamı). Çadırların orta düzleminde elde edilen akım çizgilerinin görselleri

4 Tartışma ve sonuç

Kampçılık trendleri gelişmeye devam ettikçe, araç üstü çadır kampı, doğa deneyimlerinde konfor ve macera arasında bir denge arayan açık hava meraklıları için muhtemelen popüler bir seçim olmaya devam edecektir.

Sert kabuklu araç üstü çadır tasarlarken en önemli parametrelerden birisi aerodinamik geometridir. Tasarım geometrisinin oluşturulmasında, NACA 0021 temel alınması, çadıra, aerodinamik bir performans kazandırmıştır. Bu durum araçlar için yakıt verimliliğini ve stabilitesini olumlu yönde etkileyecektir. CFD sonuçları incelendiğinde aerodinamik tasarımın, ticari modele göre daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Model M'nin ticari modele göre ortalama %86.31 daha az sürüklenme kuvveti ve %13.20 daha az aşağı yönlü kuvvet oluşturduğu gözlemlenmiştir. Ticari modelin akış analizlerinde, yüksek sürüklenme kuvvetleri küt yapısı ve aerodinamik açıdan optimize edilmemiş olmasıyla ilişkilidir.

Gelecekte özellikle pasif akış kontrol sistemleri, üretim yöntemleri de dikkate alınarak SKAÜÇ geometrisi üzerine uygulanması daha iyi sonuçlar verebilir. Elde edilen geometriler küçük ölçekli üretilerek rüzgâr tünellerinde deneysel ortamlarda aerodinamik performansı analiz edilebilir. Bununla birlikte farklı iklim koşullarında, güçlü rüzgârların, yağmurun veya karın çadırın aerodinamik performansına ve sürüş dinamiklerine etkisinin incelenmesi, daha güvenli ve verimli tasarımların geliştirilmesine katkı sağlayabilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] K. Sommer, Holidays at home-Camping and glamping as a part of domestic tourism: An overview and analysis of camping (and in particular luxury camping) as an alternative form of domestic tourism in the time of the coronavirus., *Tourismus & Hospitality*, 1-20, 2020.
- [2] G. G. Silverman, *Camping with Kids: The Complete Guide to Car, Tent, and RV Camping*, Wilderness Press, ss. 264, 2008.
- [3] K. Sommer, Types of camping accommodation. <https://camping-tourismus.com/verschiedene-arten-von-camping-unterkueften/>, Accessed 26.04.2021.
- [4] Fortune Business Insights, Camping equipment market size, share & industry analysis, by product type (backpacks, sleeping bags, tents, cooking system, furniture, and others), distribution channel (offline stores and online stores), regional forecast, 2024-2032. <https://www.fortunebusinessinsights.com/camping-equipment-market-104508>, Accessed 28.06.2024.
- [5] Business Wire, Top 3 trends impacting the camping equipment market in the US through 2021: Technavio, <https://www.businesswire.com/news/home/20170707005423/en/>, Accessed 26.04.2021.
- [6] Off Road Tents, *The Roof Top Tent Guide: The Basics To Start Camping Off The Ground (Roof Top Tents)*, Independently Published, ss. 43, 2019.
- [7] N. Espiner, E. J. Stewart, H. Fitt, S. Page, and S. Espiner, From tents and maps to vans and apps: Exploring camping mobilities, *Tourism Geographies*, 25(2-3), 670-689, 2023, <https://doi.org/10.1080/14616688.2021.1964588>.
- [8] A. Neal, What You Need to Know About Rooftop Tent Camping, *Gears and Accessories, Tents*, <https://tongmetal.com.au/rooftop-tent-camping/>, Accessed 26.04.2021.
- [9] A. Jambor and M. Beyer, New cars—new materials, *Materials & Design*, 18(4-6), 203-209, 1997, [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(97\)00049-6](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(97)00049-6)
- [10] M. Bellman, R. Agarwal, J. Naber and L. Chusak, Reducing energy consumption of ground vehicles by active flow control, *Energy Sustainability*, 43949, 785-793, 2010, <https://doi.org/10.1115/ES2010-90363>
- [11] K. S. Song, S. O. Kang, S. O. Jun, H. I. Park, J. D. Kee, K. H. Kim, and D. H. Lee, Aerodynamic design optimization of rear body shapes of a sedan for drag reduction, *International Journal of Automotive Technology*, 13, 905-914, 2012, <https://doi.org/10.1007/s12239-012-0091-7>.
- [12] R. M. Wood, Impact of advanced aerodynamic technology on transportation energy consumption, *SAE transactions*, 113, 854-874, 2004, <https://www.jstor.org/stable/44724908>

- [13] W. Sheng, R. M. Galbraith, and F. N. Coton, A new stall-onset criterion for low speed dynamic-stall, *Journal of Solar Energy Engineering*, 128(4), 461-471, 2006, <https://doi.org/10.1115/1.2346703>
- [14] M. Özden, H. H. Açikel, M. S. Genç, and K. Koca, Recognizing flow evaluation on surface of naca0015 airfoil at various angles of attack, 275-280. *International Asian Congress On Contemporary Sciences – VII, Bakü-Azerbaycan, IKSAD*, ss. 711, December 09-11, 2022.
- [15] R. Şahin, M. Ayvazoğlu, S. Keskin, M. Özden, H. H. Açikel, and M. S. Genç, Effect of airfoil thickness on flow over the symmetric airfoils: part I-experimental analysis. In *2023 10th International Conference on Recent Advances in Air and Space Technologies (RAST)*, IEEE, pp. 01-06, 2023.
- [16] H. Mansour, R. Afify, and O. Kassem, Three-dimensional simulation of new car profile. *Fluids*, 6(1), 8, 2020, <https://doi.org/10.3390/fluids6010008>
- [17] V. Chiplunkar, R. Gujar, A. Adiverekar, R. Kulkarni, and A. Thonge, Computational fluid dynamics analysis for an active rear-wing design to improve cornering speed for a high-performance car. *Materials Today: Proceedings*, 77, 887-896, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.040>
- [18] J. Broniszewski, and J. R. Piechna, Fluid-structure interaction analysis of a competitive car during brake-in-turn manoeuvre. *Energies*, 15(8), 2917, 2022, <https://doi.org/10.3390/en15082917>
- [19] F. J. Granados-Ortiz, P. Morales-Higueras, J. Ortega-Casanova, 3D CFD simulation of the interaction between front wheels&brake ducts and optimised five-element F1 race car front wings under regulations. *Alexandria Engineering Journal*, 69, 677-698, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.02.011>
- [20] Bundutec rooftop tent., <https://bundutec.co.uk/> Accessed 08.03 2024.
- [21] J. E. Matsson, An introduction to ansys fluent 2023. Sdc Publications. ss. 932, 2023.
- [22] I. Ramlan, and N. Darlis, Comparison between solidworks and ansys flow simulation on aerodynamic studies. *Journal of Design for Sustainable and Environment*, 2(2), 1-10, 2020.
- [23] F.T. Johnson, E. N. Tinoco, and N. J. Yu, Thirty years of development and application of CFD at Boeing Commercial Airplanes, Seattle. *Computers & Fluids*, 34(10), 1115-1151, 2005, <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2004.06.005>
- [24] S. R. M. Naidu, V. M. Madhavan, S. Chinta, R. Manikandan, A. Premkumar, and R. Girimurugan, Analysis of aerodynamic characteristics of car diffuser for dissimilar diffuser angles on Sedan's using CFD. *Materials Today: Proceedings*, 92, 240-248, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.379>
- [25] K. Koca, and M. Özden, Flow properties of an Ahmed Body with different passive flow control methods, *Gazi University Journal of Science Part C: Design Technology*, 12(1), 1-16, 2024, <https://doi.org/10.29109/gujsc.1333049>
- [26] R. Lanzafame, S. Mauro, and M. Messina, 2D CFD modeling of H-Darrieus wind turbines using a transition turbulence model. *Energy Procedia*, 45, 131-140, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.015>
- [27] X. Xu, H. Li, and Y. Lin, Mesh-Order independence in CFD simulation. *IEEE Access*, 7, 119069-119081, 2019, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2937450>





cZIF-8/Ti₃C₂ nanokompozitlerle kükürt katot üretimi ve lityum-sülfür bataryalarda kullanımı

Fabrication of sulfur cathode with cZIF-8/Ti₃C₂ nanocomposites and its use in lithium-sulfur batteries

Recep Yuksel^{1*} 

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Kimya Bölümü, 26040, Eskişehir, Türkiye

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Nanobilim ve Nanoteknoloji Programı, 26040, Eskişehir, Türkiye

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İleri Malzeme Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi, 26040, Eskişehir, Türkiye

Öz

Modern toplumun elektrikli araçlar, tüketici elektroniği ve şebeke-boyutu (grid-scale) depolama gibi yenilikçi teknolojiler için ihtiyaç duyduğu yüksek performanslı enerji depolama sistemlerinin geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Günümüzde yenilenebilir güneş ve rüzgâr kaynaklarından üretilen enerjinin birim maliyeti fosil yakıtlar ile rekabet edebilir seviyelere gelmiştir. Enerji depolama sistemlerinin birim maliyetleri ise henüz istenilen seviyelere gelememiştir ve hala çok pahalıdır. Bu nedenle sürdürülebilir ve ekonomik yöntemler ile yüksek performanslı enerji depolama sistemlerinin geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Bu çalışmada S/c-ZIF-8/Ti₃C₂ katotların üretimi ve karakterizasyonu yapıldı ve de yüksek-kapasiteli lityum-sülfür bataryaların (LSB'lerin) yapısal ve elektrokimyasal stabiliteyi geliştirildi. Üretilen malzemeler ve katotlar yapısal ve kimyasal karakterizasyon sonrasında Li-S bataryalarda kullanılarak performans ilintili özellikleri incelenmiştir. Üretilen Li-S bataryalar yaklaşık 1000 mAh/g spesifik kapasiteye sahiptir. Üretilen S/c-ZIF-8/Ti₃C₂ katotlar ile kükürtün yalıtıcı doğasından kaynaklanan ve lityum polisülfürün neden olduğu olumsuz etkiler giderildi.

Anahtar kelimeler: Enerji depolama, Lityum-sülfür bataryalar, MOF, MXene

1 Giriş

Modern toplumun elektrikli araçlar, akıllı binalar ve tüketici elektroniği gibi yenilikçi teknolojiler için ihtiyaç duyduğu ve giderek artan bir enerji talebi vardır. Bu talep sürdürülebilir ve ekonomik enerji üretim ve depolama sistemlerine olan gereksinimi artırmıştır [1, 2]. Düşük maliyetli ve sürdürülebilir yöntemlerle yenilikçi enerji üretim ve depolama teknolojileri geliştirmek için küresel çapta büyük bir yarış vardır. Bir dizi yapısal sınırlamalar nedeniyle klasik lityum iyon bataryalar enerji yoğunluğu ve maliyet etkinliği açısından yeni nesil elektrikli araçlar ve şebeke ölçeğinde enerji depolama sistemlerinin zorlu talebini karşılayamamaktadır. Örneğin, klasik interkalasyon tipi katot malzemelerinin depolama kapasitesi genellikle <200 mAh g⁻¹ ile sınırlıdır. Katot malzemesi olarak

Abstract

It is of great importance to develop the high-performance energy storage systems that modern society needs for innovative technologies such as electric vehicles, consumer electronics, and grid-scale storage. Today, the unit cost of energy produced from renewable solar and wind sources has reached levels competitive with fossil fuels. Unit costs of energy storage systems have not yet reached the desired levels and are still very expensive. Therefore, there is a need to develop high-performance energy storage systems using sustainable and economical methods. In this study, the fabrication and characterization of S/c-ZIF-8/Ti₃C₂ cathodes were done, and the structural and electrochemical stability of high-capacity lithium-sulfur batteries (LSBs) was improved. After the structural and chemical characterization of the produced materials and cathodes, they were used in Li-S batteries and their performance-related properties were examined. The fabricated Li-S batteries have a specific capacity of approximately 1000 mAh/g. With the fabricated S/c-ZIF-8/Ti₃C₂ cathodes, the adverse effects caused by the insulating nature of sulfur and lithium polysulfide are eliminated.

Keywords: Energy storage, Lithium-sulfur batteries, MOF, MXene

kullanılan bazı metal oksitler sınırlı kaynaklara ve coğrafi olarak zor erişime sahiptir. Bu nedenle, yüksek kapasiteye ihtiyaç duyan yeni nesil uygulamalar için geliştirilecek pil/batarya teknolojilerinin, kolay temin edilebilen, yüksek kapasiteli, sürdürülebilir ve ekonomik malzemelerle geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir.

2000'lerin başında geliştirilmeye başlayan lityum-hava piller ise büyük bir bilimsel ilgi gördü [3]. Teorik olarak lityum ve oksijenin (hava ortamında) bir araya gelerek elektrokimyasal tepkime çifti oluşturmasıyla çok yüksek enerji yoğunluğuna sahip Li-hava pilleri üretildi. Ancak Li-hava batarya sisteminin sahip olduğu teknik zorluklar, yüksek faydanın yanı sıra aşırı yüksek güvenlik riskini de beraberinde getirmektedir. Li-hava pillerine olan ilginin zamanla azalmasıyla, ilk deneysel çalışmaları 1960'larda yapılmasına rağmen 2010'larda ümit verici bir teknolojiye

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: recep.yuksel@ogu.edu.tr (R. Yuksel)

Geliş / Received: 06.08.2024 Kabul / Accepted: 28.08.2024 Yayımlanma / Published: 15.10.2024

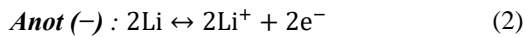
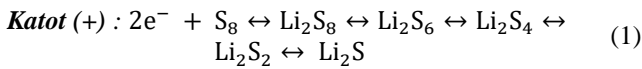
doi: 10.28948/ngumuh.1529404

dönüşen lityum-sülfür batarya (LSB) teknolojisi ortaya çıktı [4].

Lityum-sülfür bataryalardaki katot elektrot aktif malzemesini oluşturan kükürt (S) çok eski zamanlardan beri bilinen ve kullanılan bir elementtir [5]. Kükürt, doğada elementel halde bulunan birkaç maddeden biridir ve yer kabuğundaki en çok bulunan 16. element olması nedeni ile yaygın olarak bulunur [6-11]. Elektrokimyasal açıdan ise kükürt, atom başına iki elektron transferi ile teorik olarak 1675 mAh g⁻¹ spesifik kapasiteye sahiptir [11]. Bu spesifik kapasite değeri, lityum iyon bataryaların tipik metal oksit katotlarının yaklaşık 10 katıdır ve katı hal katot malzemeleri arasında en yüksek kapasite değerlerinden biridir [9]. Yukarıdaki tüm özellikler, kükürtün yüksek enerji yoğunluğu, düşük maliyetli ve çevreye zarar vermeyen batarya sistemlerinin geliştirilmesi için ideal bir katot malzemesi olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, Li-S bataryaların ortaya çıkışı, hem akademik hem de endüstriyel enerji depolama araştırmalarında büyük bir ilgi uyandırmıştır.

Lityum-sülfür bataryalar, lityum-iyon bataryalara göre oldukça farklı bir çalışma prensibine sahiptir [11]. Li-iyon bataryalarda pozitif elektrotlar genelde tünel veya tabakalı yapılara sahip metal oksitlerden (LiMO_x) oluşurlar. Benzer şekilde negatif elektrot malzemeleri de tabakalı yapılara sahiptirler. Bu yapılar sayesinde hücrenin (bataryanın) şarjı ve deşarjı esnasında Li⁺ iyonları pozitif ve negatif elektrotları arasında karşılıklı olarak yer değiştirebilmektedir. Li-S bataryalarında ise elde edilen enerji lityum iyonun (Li⁺) sülfür iyonu (S²⁻) ile reaksiyona girmesi prensibine dayanmaktadır. Li-S bataryaların elektrokimyasal reaksiyon mekanizması aşağıdaki denklemler ile net bir şekilde ortaya konmuştur [8]. Elektrokimyasal yük boşaltma (deşarj) sırasında, elementel kükürt bir dizi çözünür lityum polisülfür (LPS) ve bazı katı faz polisülfürlere indirgenerek katot elektrotunda depolanır (Denklem (1)) [5]. Şarj sırasında ise, deşarj prosesinin tüm adımları ters olarak gerçekleşir. Anot elektrotundaki reaksiyonlar ise Li metalinin tersine çevrilebilir bir şekilde çözünmesi ve kaplanması şeklinde gerçekleşir (Denklem (2)).

Bir Li-S hücrenin genel reaksiyonu Denklem (3) olarak basitleştirilebilir.



Li-S bataryalar ile ilgili yapılan bilimsel çalışmaların büyük bir çoğunluğu, S katodu ile ilgilidir. LSBların geliştirilmesinde yaşanan temel zorluklar: kükürtün yalıtkan doğası (25 °Cde 5*10⁻³⁰ S cm⁻¹) ve elektrokimyasal prosesler sırasında hacim artışı gibi bir dizi kendine özgü problemlerdir. Bu problemlerden daha da önemlisi, çözünür polisülfürlerin şarj/deşarj sırasında katottan anoda doğru geçmesi ile oluşan polisülfür mekik etkisi (shuttle effect) ile hızlı kapasite kaybına yol açmasıdır [5, 12]. Yukarıda

bahsettiğimiz tüm bu sorunlar kükürtün etkin ve verimli bir biçimde kullanılmamasına, LSB kullanım ömrünün azalmasına ve ciddi kapasite kayıplarına yol açmaktadır. Bu nedenle, yüksek performanslı LSBlar için kükürt ile uyumlu ve onu tutabilecek konak malzemelerinin geliştirilmesine ihtiyaç vardır [13].

Li-S bataryalar ve benzeri elektrokimyasal enerji depolama sistemlerinin performansı elektrot aktif malzemelerinin gözenek boyutu, gözenek hacmi, yüzey alanı, heteroatom katılanması, iyon difüzyonu ve elektronik iletkenlikleri gibi birçok yapısal ve kimyasal özellik ile çok yakından ilintilidir. Yapılan bilimsel araştırmalar, yüksek performanslı Li-S bataryaların geliştirilmesinde, yüksek elektronik iletkenliğe sahip gözenekli malzemeler ve kükürtün fiziksel olarak tutulmasını sağlayacak kafes tipi yapılara dikkat çekmektedir [5, 9]. Bu konudaki en etkili yaklaşım ise karbon temelli bir konak yapı içerisinde kükürtü fiziksel olarak tutabilmektir. Çevreye duyarlı, ekonomik ve kolay uygulanabilirliği nedeni ile eriyik difüzyonu kükürtün konak yapıya depo edilmesinde en yaygın kullanılan yöntemdir [14-16]. Karbon yapıların esnek ve yüksek elektronik iletkenliği sahip olması yalıtkan kükürtün daha etkin ve verimli bir şekilde kullanımını sağlamaktadır. Bu nedenle, istenilen yapısal özelliklere sahip yeni malzemelerin geliştirilmesi yüksek performanslı Li-S batarya sistemleri için çok önemlidir.

Metal organik çerçeve yapıların (MOFların) bir alt grubu olan zeolitik imidazol çerçeve yapılar (ZIFler) sahip oldukları kristal yapı, geniş yüzey alanı, yüksek mikrogözenek hacmi ve kimyasal stabilite gibi ümit verici yapısal özellikleri nedeniyle dikkat çekmektedirler. Bu MOF yapılardan ZIF-8, MOFların en çok araştırılan üyelerindedir. Çinko (Zn) metal merkezlerinin 2-metilimidazol (HMIM) ligandıyla Zn-N bağları ile bağlanmasıyla oluşurlar. ZIFler, yaklaşık 1 nm boyutunda kafeslere sahip sodalit tipi bir kristal yapıya sahiptirler. Yüksek spesifik yüzey alanı (ZIF-8: 1947 m² g⁻¹) ve yüksek mikro gözenek hacmine (ZIF-8: 0,663 cm³ g⁻¹) sahiptirler [17]. Diğer taraftan, MOF yapıların birçoğu, enerji depolama sistemlerinde kullanılacak kadar iyi iyonik ve elektronik iletkenliğe sahip değildirlir [13]. Fakat MOFların karbonize edilmesi ile elde edilen heteroatom katkılı karbon malzemeler çok daha iletkenlerdir. MOFtan türetilen karbon yapılar, türetildikleri MOFun yüzey alanı ve gözenek boyutu gibi yapısal özelliklerini koruyabilirler [3]. Literatürde ZIF-8 türetilen karbon malzemeler kükürt tutucu karbon konak olarak LSBlarda kullanıldığı bildirilmiştir [18]. ZIF-8'in karbonize edilmesi ile elde edilen mikrogözenekli karbon yapı içerisine hapsedilmiş kükürt katotlar Li-S bataryalardaki çözünmüş polisülfürlerin difüzyonunu yavaşlatmayı başarmıştır. Ayrıca yoğun kükürt içeriğine (ağırlıkça % 59 S) sahip ZIF-8 türetilen karbon yapı yüksek elektrokimyasal kapasite göstermiştir. Diğer taraftan, bugüne kadar incelenen kükürt katotlardaki MOF türetilen karbon konaklar koloidal parçacıklardan oluşmaktadır ve genellikle mikrometre altı boyuttadırlar. MOF türetilen kükürt tutucu karbon konak yapılarda elektron transferi artan parçacık sayısı ve yalıtkan kükürt nedeniyle yavaşlamakta, elektronik iletkenlik sınırlı kalmakta, difüzyon kinetiği

azalmakta ve temas direnci artmaktadır. Tüm bu süreçler LSB performansının ve kullanım ömrünün azalmasına sebep olabilmektedir.

Li-S bataryalarda elektrokimyasal prosesler sırasında oluşan çözünür lityum polisülfür (LPS) bileşikler katot elektrotu bölümünden anot bölümüne geçerek elektrokimyasal performansa ve kapasiteye ciddi zarar verdiğinden yukarıda bahsetmiştik. MOFtan türetilen heteroatom katkılı karbon yapıların önemli bir özelliği de sahip oldukları polar ve hidrofilik yüzeyleridir [1, 19]. Polar karbon yapılar yani heteroatom katkılı karbon yapılar elektrokimyasal prosesler sırasında oluşan LPSlerin karbon konak içerisinde tutulmasında çok etkilidirler. Heteroatom katkılı yapıların elektrolit çözeltisi ile iyi bir şekilde ıslanabiliyor olması hem kükürt katotun performansını hem de elektrolitin elektrokimyasal stabilitesini ciddi anlamda artırmaktadır [4]. Bu nedenle heteroatom katkılı karbon yapılar Li-S bataryaların gelişimi için önemli bir bileşen olmaya adaydırlar.

Li-S bataryaların elektrokimyasal performansını ve kullanım ömrünü artırmak için kükürt tutucu konak yapı olarak MOF türevi karbon malzemelerin kullanılması doğru ve başarılı bir yaklaşım olmakla birlikte arzu edilen elektronik ve iyonik iletkenlik değerlerinin sağlanamaması ve reaksiyon kinetiğini yavaşlatması nedeni ile henüz istenilen performansı tam anlamıyla gösterememektedir. Bu nedenle iyon difüzyon mesafesini kısaltacak, elektronik iletkenliği artıracak, yük transferini kolaylaştıracak, aktif lityum depolama alanlarını artıracak ve MOF yapılarla birlikte üç boyutlu bütünleşik bir yapı oluşturacak iki boyutlu iletken malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır.

Yüksek iletkenliği sahip grafen ve metal kalkojenitler gibi tabakalı ve iki boyutlu (2B) atomik kalınlıktaki malzemeler, sahip oldukları eşsiz morfolojileri nedeniyle yüksek kapasiteli Li-S bataryalar için potansiyel katot malzemeleridirler. MXeneler iki boyutlu ve katmanlı metal karbür ya da metal nitrür malzemelerdir. MXeneler her ne kadar elektromanyetik radyasyon soğurulması, kompozitlerin güçlendirilmesi, su arıtımı, sensörler, kanser tedavisi, yağlayıcılar, alan etkili transistörler, saydam iletkenler, katalizörler, plazmonik ve termoelektrik gibi birçok farklı uygulama alanlarında kullanılıyor olsalar da ilk ve en çok kullanıldıkları uygulama alanı elektrokimyasal enerji depolama sistemleridir [20]. MXeneler genellikle A elementinin MAX fazından seçili olarak aşındırılmasıyla elde edilir. MAXın genel formülü $M_{n+1}AX_n$ 'dir ($n = 1-3$), burada M: geçiş grubu metallerini, A: grup IIIA veya IVA elementini ve X: karbon veya nitrojen atomunu temsil eder [21]. $Ti_3C_2T_x$ MXene yapıların sahip olduğu yüksek kapasite değerleri hem lityum iyonlarının daha fazla sayıda elektrokimyasal aktif bölgeye ulaşması hem de interkalasyon esnasında iyonların MXene tabakaların arasına girerek topaklaşmalarını önlemesinden kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte enerji depolama çalışmalarında kullanılan esnek altlıklar üzerine baskılanmış ince $Ti_3C_2T_x$ MXene elektrotlar oldukça yüksek şarj ve deşarj oranlarında bile yüksek bir kapasitif davranış göstermektedir. Bu nedenle MXenelerin Li-S bataryalarda kullanılması istenilen yüksek geri dönüşümlü kapasiteye, mükemmel elektron ve iyon transfer

performansına ve ideal enerji yoğunluğuna ulaşılmasını sağlayabileceklerdir.

LSBlarda kullanım için MXene ve MOF bileşenlerden meydana gelecek bir kompozit MOF/MXene yapının yüksek enerji yoğunluğu, iyi elektronik ve iyonik iletkenlik için gözenekli bir yapıda ve yüksek bir yüzey alanına sahip olması gerekmektedir. İki boyutlu $Ti_3C_2T_x$ MXene ile MOF (ZIF-8) yapıların birlikte kullanılarak, bu iki yapının ayrı ayrı sahip olduğu yüksek elektronik iletkenlik ve yüksek mikrogözenek hacmi özellikleri ile üç boyutlu kompozit bir yapı içerisinde daha etkili bir kükürt tutucu katot iskeleti oluşturulabilmektedir. Ve bu 3B nanokompozit katot yapısının Li-S batarya performansına ciddi katkı sağlaması kuvvetle muhtemeldir. Çünkü üç boyutlu gözenekli ağ yapısı, bu elektrot malzemelerinin elektronik iletkenliğini korurken yük transfer kinetiğini de artırmaktadır [22]. Bu nedenle, bu çalışmada yüksek enerji yoğunluklu Li-S bataryalar elde etmek amacıyla MOFların ve MXenelerin olumlu özellikleri bir araya getirilerek üç boyutlu MOF/MXene temelli kükürt tutucu kompozit katot üretimi gerçekleştirilmektedir. Üretilen üç boyutlu kompozit yapılar sayesinde yüksek elektriksel iletkenliğe, üstün elektron transfer özelliğine, yük transfer hareketliliğine ve geniş yüzey alanına sahip katotlar ile tasarlanan Li-S bataryalar yüksek şarj-deşarj verimliliğine, uzun kullanım ömrüne ve yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmaktadır.

2 Materyal ve metod

2.1 Kompozit katot üretimi

2.1.1 Ti_3C_2 MXene üretimi

İki boyutlu Ti_3C_2 MXene üretimi için Nanografi firmasından temin edilen toz halindeki Ti_3AlC_2 MAX fazı kullanılmıştır. Ti_3AlC_2 yapısındaki Al atomik tabakalarını aşındırmak için 9,0 M HCl asit içerisine 5 gram LiF tuzu eklenerek asit karışımı hazırlandı. 3 gram MAX tozu 40 mL asit karışımına parça parça eklenerek oda sıcaklığında (<35 °C) 24 saat manyetik karıştırıcı ile 350 rpm hızda karıştırıldı. Daha sonra saflaştırma işlemleri için çözelti pH değeri yaklaşık 6 oluncaya kadar tekrarlı bir şekilde saf su ile 5 dakika süre ile 3500 rpm hızda santrifüj yapıldı. Ti_3C_2 MXene yapıları su içerisinde homojen dağıtılmış koloidal MXene çözeltisi haline getirmek için 1 saat boyunca ultrasonik banyoda bekletildi ve daha sonra dağıtılmış 2B Ti_3C_2 MXene yapılar santrifüj yardımı ile toplanarak 2,0 mg/mL derişimde çözelti haline getirildi.

2.1.2 ZIF-8/ Ti_3C_2 nanokompozit malzeme sentezi

ZIF-8/ Ti_3C_2 nanokompozit üretimi için 2,0 mg/mL derişimdeki MXene çözeltisi içerisine çinko nitrat tuzu eklenerek manyetik karıştırıcı yardımı ile yüksek hızda karıştırılarak homojen çözelti elde edildi. Zn iyonlarının Ti_3C_2 yapılar üzerine adsorplanmasını takiben organik ligand 2-metilimidazol (2-HMIM) çözeltisi manyetik karıştırıcı üzerindeki ilk çözeltiye eklendi ve yüksek hızda 20 dk daha karıştırıldı. Nanokompozit üretimi için Zn tuzu: 2-HMIM molar oranı 1:20 olarak belirlendi. Hazırlanan çözelti oda şartlarında herhangi bir karıştırma işlemi yapılmadan bir gece boyunca bekletilerek nanokompozit yapının oluşması sağlandı. Elde edilen MOF/MXene

nanokompozit yapılar santrifüj yardımı ile reaksiyona girmemiş ligand grupları ve metal tuzlarından arındırıldı. Oluşan ZIF-8/Ti₃C₂ MOF/MXene yapıları saf su içerisinde dondurulduktan sonra liyofilizatör ile kurutma işlemine tabi tutularak aerogel haline getirildi. Çalışma kapsamında kütlece üç farklı oranda ZIF-8/Ti₃C₂ (1/1, 3/1, ve 5/1 oranında) nanokompozit yapı sentezlenmiştir.

2.1.3 ZIF-8/Ti₃C₂ MOF/MXene nanokompozit yapıların ısıtılma işlemi uygulanması

Islak kimya yöntemi ile elde edilen ZIF-8/Ti₃C₂ MOF/MXene nanokompozit yapılar daha sonra split tüp fırın kullanılarak düşük basınç (<20 mbar) ve argon gaz akışında (100 sccm) ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur. ZIF-8/Ti₃C₂ MOF/MXene yapıları 10 °C/dk sıcaklık artış hızı ile 2 saat 600 °C'de ısıtılma işlemi uygulanmıştır. İşlem sonunda oda sıcaklığına kadar kendi kendine soğuyan malzemeler ısıtılma sırasında içerisinde oluşan metal oksit ve metal yapılardan arındırılmak için 2,0 M HCl çözeltisi içerisinde bir gün bekletilmiş ve sonra de-iyonize su ile yıkanarak saflaştırılmıştır. Elde edilen c-ZIF-8/Ti₃C₂ c-MOF/MXene nanokompozit yapılar vakum etüvde 80 °C'de bir gece boyunca kurutulmuştur.

2.1.4 c-ZIF-8/Ti₃C₂ c-MOF/MXene nanokompozit yapıların kükürt doldurulması

c-ZIF-8/Ti₃C₂ c-MOF/MXene nanokompozit yapıları elementel kükürt yükleme işlemi için eriyik füzyonu yöntemi kullanıldı. Bu yöntem ile katı haldeki elementel kükürt ile sentezlenen nanokompozit (3:1) oranında fiziksel olarak karıştırıldıktan sonra PTFE iç hazneli paslanmaz çelik hidrotermal reaktör içerisinde yerleştirildi. Hazırlanan reaktör etüv fırın içerisinde 155 °C'de 12 saat tutuldu ve yüksek sıcaklıkta sıvı hale gelen kükürtün nanokompozit yapı içerisinde difüzyonu sağlandı. Daha sonra oda sıcaklığına kendi kendine soğuyan reaktörden üretilen S/c-ZIF-8/Ti₃C₂ nanokompozit yapılar toplandı.

2.2 Li-S bataryaların üretimi

2.2.1 Katot elektrotlarının üretimi

Sentezlenen S/c-ZIF-8/Ti₃C₂ nanokompozit yapılar polimer yapılı bağlayıcı polivinilidinden florür (PVDF) ve iletkenlik sağlayıcı karbon siyahı (CB) ile birlikte N-metil-2-pirolidon (NMP) çözücü içerisinde manyetik karıştırıcı yardımı ile homojen bir şekilde dağıtılıp mürekkep haline getirildi. Bu hazırlanan mürekkep karışımında aktif malzeme (S/c-ZIF-8/Ti₃C₂): PVDF:CB oranı 8:1:1'dir. Hazırlanan katot malzemesi karışımı Dr. Blade yöntemi ile alüminyum metal folyo üzerine ince bir film halinde kaplanmıştır. Bir süre oda şartlarında kurutulan ince film katot elektrotları daha sonra 60 °C'de 24 saat boyunca vakum kontrollü etüvde kurutuldu. Daha sonra hazırlanan ince film katot elektrotları disk kesici yardımı ile 15 mm çapında kesilerek Li-S batarya üretimine hazır hale getirildi.

2.2.2 Li-S bataryalar için elektrolit üretimi

Li-S bataryalarda elektrolit çözeltisi olarak 1,0 M lityum bis(triflorometanosülfonil)imid (LiTFSI) tuzu 1,3-dioksolan (DOL) ve dimetoksietan (DME) (hacimce 1:1) çözücü karışımı içerisinde ve 0,5 M LiNO₃ tuzu katkısı kullanılarak

hazırlandı. Elektrolit hazırlama işlemleri Argon atmosferli glovebox (O₂<0,1 ppm ve H₂O<0,1 ppm) içerisinde ısıtıcı manyetik karıştırıcı ile karıştırılarak hazırlandı ve glovebox ortamında muhafaza edildi.

2.2.3 Düğme tipi (2032) Li-S bataryaların üretimi

Üretilen kompozit katot elektrotları, elektrolit çözeltisi ve hazır olarak temin edilen lityum metal folyolar glovebox içerisinde 2032 düğme tipi Li-S bataryaların üretiminde kullanıldı. Anot ve katot elektrotları birbirinden fiziksel olarak ayırmak için ticari Celgard 2400 ayraç/separatör kullanıldı. Elektrolit (μL)/kükürt (mg) oranı S/c-MOF/MXene katotlar için 20 olacak şekilde elektrolit çözeltisi kullanılarak bataryalar üretilir. Üretilen bataryalar en az 1-2 saat ortam şartlarında dinlendirildikten sonra elektrokimyasal ölçümlerde kullanıldı.

2.3 Karakterizasyon

2.3.1 Yapısal ve kimyasal karakterizasyon

Üretilen malzeme ve elektrotların yapısal ve kimyasal karakterizasyonları çeşitli yöntem ve metotlarla gerçekleştirildi. Taramalı elektron mikroskopu (SEM) genel olarak parçacık boyutu ve yüzey morfolojisini gözlemlemek için kullanıldı. X-ışını kırınım spektroskopisi (XRD) kristal ve kimyasal faz analizleri için kullanıldı. Yüzey alanı belirlemek için BET (Brunauer, Emmett and Teller) yöntemi kullanıldı. Kompozit yapılarıdaki kükürt miktarı termal gravimetrik analiz (TGA) yöntemi ile belirlendi.

2.3.2 Elektrokimyasal karakterizasyon

Üretilen Li-S bataryaların elektrokimyasal performans analizleri halkalı voltametri (CV), galvanostatik şarj-deşarj (GCD) ve kullanım ömrü testleri ile gerçekleştirildi. CV ölçümleri 1,6-2,8 V voltaj aralığında ve 0,1-0,5 mV s⁻¹ tarama hızlarında gerçekleştirildi. Tarama hızları kükürtün redoks piklerinin pozisyon değişimine göre karar verildi. GCD ölçümleri 0,1-2,0 C-hızında gerçekleştirildi. 1,0 C-hız değeri kükürtün teorik kapasitesi olan 1675 mAh g⁻¹ referans alınarak katot elektrotunda kullanılan kükürt miktarına göre belirlendi.

2.3.3 Polisülfür adsorbsiyon testi

Polisülfür adsorbsiyon testi için 0,5 M Li₂S₆ solüsyonu, Li₂S ve kükürtün DOL/DME solüsyonuna (hacimce 1:1) 1:5 molar oranında eklenmesi ve ardından 70 °C'de 24 saat kuvvetlice karıştırılmasıyla hazırlandı. Aynı kütleyle sahip c-ZIF-8/Ti₃C₂ nanokompozit malzeme başka bir DOL/DME çözeltisi (2 mL) içinde seyreltilmiş hazır Li₂S₆ çözeltisi (10 μL) içeren kapalı şişelere eklendi. Polisülfür çözeltisi renk değişimi zamana bağlı olarak takip edildi.

3 Bulgular ve tartışma

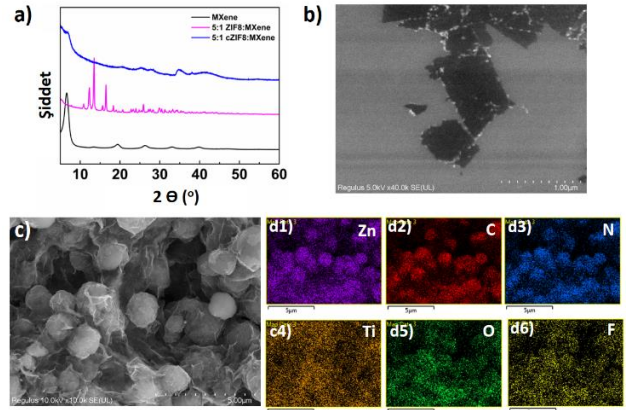
Ti₃C₂ MXeneler sahip oldukları iki boyutlu yapıları ve yüksek elektronik iletkenlikleri nedeni ile dikkat çekmektedirler. Çalışma kapsamında Ti₃C₂T_x (ya da Ti₃C₂) MXene, Ti₃AlC₂T_x MAX fazından LiF+HCl çözeltisi yardımı ile aşındırılarak elde edildi. Bu işlem sırasında 2B tabakalar akordeon gibi bir yapı oluşturmakta ve daha sonra ultrasonik banyo kullanılarak homojen çözelti haline getirilmektedir. Şekil 1(a)'da ticari olarak temin edilen MAX

fazından üretilen Ti_3C_2 MXene yapılarına ait XRD kırınım deseni yer almaktadır. Ti_3C_2 XRD kırınım deseni Al tabakalarının yapıdan başarılı bir şekilde ayrıldığını ve aynı zamanda MXene levhalarının yüzeylerinin fonksiyonel gruplar ile kaplandığını göstermektedir. Elde edilen XRD kırınım deseni literatürdeki çalışmalar ile uyumludur [23]. MXene yapılar OH^- , O , ve F^- gibi fonksiyonel gruplar ile dekore edildiğinden mekanik prosesler ile birbirinden ayrılabilen ve homojen çözelti haline getirilebilmektedir. Üretilen iki boyutlu Ti_3C_2 MXene yapılarına ait SEM görüntüsü Şekil 1(b)'de yer almaktadır. SEM görüntüsünde görüldüğü üzere MXene yapılar dağıtılmış halde silisyum alttaş üzerine kaplanmıştır.

İki boyutlu Ti_3C_2 MXene yapılar ile ZIF-8 MOF yapılar birlikte kullanılarak nanokompozit haline getirilmiştir. MOF yapılı oluşturan Zn iyonları MXene yapılar ile manyetik karıştırıcı yardımı ile karıştırılmış ve metal iyonlarının MXene yapılar üzerine koordine olması sağlanmıştır. Daha sonra 1:20 molar metal iyonu:ligand oranına göre eklenen ligand grupları ile MOF yapılar MXene tabakalar üzerinde kontrollü bir şekilde sentezlenmiştir. Çalışma kapsamında ZIF-8/ Ti_3C_2 nanokompozitler kütlece üç farklı oranda (ZIF-8: Ti_3C_2 , 1:1, 3:1 ve 5:1) sentezlenmiş ve daha sonra karbonize edilerek c-ZIF-8/ Ti_3C_2 nanokompozitleri elde edilmiştir. Kütlece farklı oranlarda ZIF-8 içeren nanokompozitlerin heteroatom katkı oranlarının ve spesifik yüzey alanlarının farklı olması, bu sayede katot elektrotta kullanılacak kükürt miktarının kontrol edilmesi amaçlanmıştır. Şekil 1(a)'da kütlece 5-1 oranında ZIF-8 ve Ti_3C_2 içeren nanokompozit yapısı ve bu yapıdan ısıtılma işlemi sonucunda elde edilen cZIF-8/ Ti_3C_2 yapısına ait XRD desenleri görülmektedir. Kütlece 5-1 oranında ZIF-8 ve Ti_3C_2 'den oluşan üç boyutlu aerjel yapıya ait XRD deseninde ZIF-8'e ait karakteristik kırınım deseni pikleri görülmektedir. MOF'ların düzgün kristal yapısı nedeni ile ZIF-8 ait pikler kuvvetli bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Yine Şekil 1(a)'da 600 °C'de düşük basınç ve argon gazı akışı altında ısıtılma işlemi görmüş nanokompozit yapıya (cZIF-8/ Ti_3C_2) ait kırınım deseni görülmektedir. Yüksek sıcaklık ortamında Ti_3C_2 levhalar yüzeyinde bulunan fonksiyonel gruplar azalmakta ve ZIF-8 yapılar da karbonize olarak heteroatom (azot) katkılı karbon yapılarına dönüşmektedir. Tüm bu işlemler sonucunda elde edilen cZIF-8/ Ti_3C_2 nanokompozit yapıya ait XRD kırınım deseni ZIF-8 kırınım desenlerinden arınmış bir şekilde sadece MXene kırınım deseni baskın olarak elde edilmiştir. Karbonizasyon işlemi sonrasında ZIF-8 kristal yapısına ait pikler XRD deseninde büyük oranda kaybolmasının nedeni ise oluşan heteroatom katkılı karbon yapısının nispeten amorf olduğunu göstermektedir.

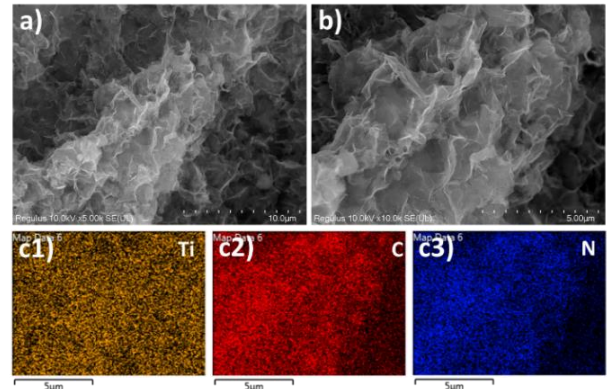
Sentezlenen 3-1 oranında ZIF-8/ Ti_3C_2 içeren nanokompozit yapının SEM ve EDS elementel haritalama görüntüleri Şekil 1(c)-(d)'de yer almaktadır. ZIF-8 yapılar MXene levhalar üzerinde ve de MXene levhaları da içlerine alarak nanokompozit halinde sentezlenmiştir. Elde edilen yapılar homojen ve üç boyutlu bir yapıda oluşmuştur. Şekil 1(d)'de yer alan EDS elementel haritalama görüntülerine göre yapıyı oluşturan elementlerden titanyum sadece

MXene'de yer alırken, çinko ve azot elementlerinin kaynağı ZIF-8 yapılarıdır.



Şekil 1. (a) MXene ve ZIF-8/MXene yapılarına ait XRD kırınım desenleri, (b) Silisyum alttaş üzerinde iki boyutlu MXene yapılarına ait SEM görüntüsü, (c) Kütlece 3/1 oranında ZIF-8/ Ti_3C_2 MXene yapılarına ait SEM ve (d) EDS elementel haritalama görüntüleri

Şekil 2'de 5/1 oranında ZIF-8/ Ti_3C_2 içeren nanokompozit malzemenin 600 °C'de 2 saat süre ile argon atmosferinde ısıtılma işlemi görmesi sonucunda elde edilen cZIF-8/ Ti_3C_2 yapıya ait SEM ve EDS elementel haritalama görüntüleri yer almaktadır. SEM görüntülerinde karbonizasyon işlemi sonrasında nanokompozit yapının yüksek yüzey alanına sahip üç boyutlu bir morfolojiye dönüştüğü görülmektedir. EDS elementel haritalama görüntülerinde ise örneklerin yüksek oranda N içerdiği gözlemlenmiştir. Bu durum MOF yapılarının yüksek oranda N heteroatomu içeren karbon yapılarına dönüştüğünü göstermektedir.

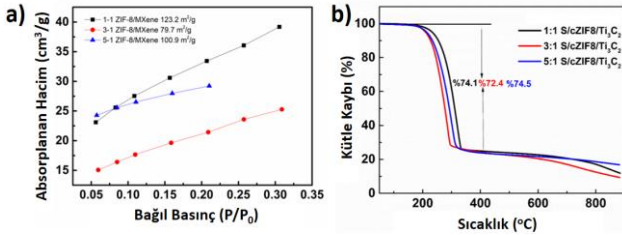


Şekil 2. Kütlece 5/1 oranında cZIF-8/ Ti_3C_2 MXene yapılarına ait SEM ve EDS elementel haritalama görüntüleri

MXene yapılar diğer iki boyutlu yapılar göre daha küçük levha genişliğine sahip olmaları, 3 sıra metal ve 2 sıra karbon atomlarından oluşan katmanlı yapıları nedeni ile nispeten daha düşük spesifik yüzey alanına sahiptirler. Diğer taraftan iki boyutlu yapıları ve parçacık morfolojisindeki MOF yapılar ile kompozit haline getirilmeleri sonucu elde edilen cMOF/MXene yapılar yüksek yüzey alanına ve

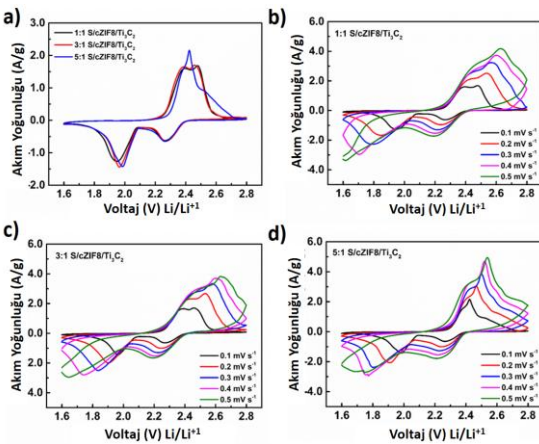
gözenek hacmine sahiptirler. Şekil 3(a)'da kütlece farklı oranlarda ZIF-8 ve MXene içeren yapılardan elde edilen ZIF-8/MXene nanokompozit yapılarına ait yüzey alanı analizi yer almaktadır. Üretilen 1:1, 3:1 ve 5:1 oranlarındaki ZIF-8/MXene nanokompozit yapılar sırası ile 123.2, 79.7 ve 100,9 m²/gr yüzey alanına sahiptirler.

Çalışma kapsamında üretilen heteroatom katkılı cZIF-8/Ti₃C₂ yapıya kükürt yükleme işlemi yapıldı. Şekil 3(b)'de S/cZIF-8/Ti₃C₂ nanokompozit yapılara ait TGA sonuçları yer almaktadır. TGA analiz sonuçları kütlelerinin üç katı kadar kükürt ile karıştırılan cZIF-8/Ti₃C₂ nanokompozitlerin yaklaşık % 72-75 oranında kükürt içerdiğini göstermiştir.



Şekil 3. (a) ZIF-8/MXene nanokompozit yapıların yüzey alanı analizi, (b) S/cZIF-8/Ti₃C₂ nanokompozit yapılara ait TGA analizi

Kütlece farklı oranlarda cZIF-8 ve Ti₃C₂ içeren nanokompozitler kullanılarak hazırlanan S katotlar ve Li-S cihazlarına ait elektrokimyasal performans ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan Li-S hücrelerin 1,6 V-2,8 V aralığında döngüsel voltametri (CV) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Kütlece 1:1, 3:1, 5:1 oranındaki cZIF-8/Ti₃C₂ nanokompozit ile hazırlanan S katotuna ait CV ölçümleri Şekil 4'te yer almaktadır. Kükürte ait yükseltgenme pikleri 2,4 V bölgesinde yer alırken, indirgenme pikleri 2,25 ve 1,95 V bölgesinde gözlenmiştir. Kütlece 5:1 oranındaki cZIF-8/Ti₃C₂ nanokompozit ile hazırlanan Li-S batarya keskin bir yükseltgenme pikine sahip iken diğer oranlardaki nanokompozitler ise ikili tepe göstermektedir.



Şekil 4. (a) S/cZIF-8/Ti₃C₂ katotlar ile hazırlanan Li-S bataryaların 0,1 mV/s tarama hızındaki CV ölçümleri, (b)-(d) Kütlece farklı oranlarda cZIF-8/Ti₃C₂ içeren katotlar ile hazırlanan Li-S bataryaların farklı tarama hızındaki CV ölçümleri

S/cZIF-8/Ti₃C₂ katotlar ile farklı tarama hızlarında elde edilen CV grafikleri Şekil 4'te yer almaktadır. Elde edilen CV grafiklerine göre tarama hızı arttıkça kükürte ait yükseltgenme ve indirgenme pikleri sırası ile daha yüksek ve daha düşük voltaj değerlerine kaymaktadır. Elde edilen sonuçlar üretilen katot elektrotlarının geri döndürülebilir elektrokimyasal performansa sahip olduğunu göstermektedir.

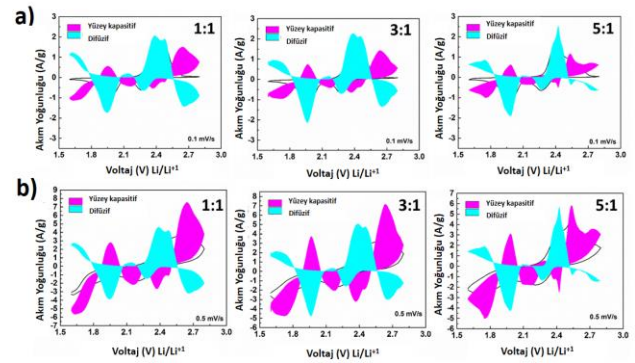
Elektrokimyasal kinetik performans hesaplamaları Denklem (4) ve (5) aracılığıyla analiz edilir;

$$i = av^b \quad (4)$$

$$i(v)/v^{1/2} = k_1.v + k_2.v^{1/2} \quad (5)$$

Burada k₁.v, yüzey kapasitif temelli katkının baskın olduğunu gösterirken, k₂.v^{1/2} difüzyon temelli katkının etkin olduğu anlamına gelir.

Genel olarak yüksek yüzey alanlı malzemeler yüzey kapasitif etkiyi daha yaygın göstermektedir. Tarama hızı azaldığında ise difüzyif (mavi renk) prosesler etkin iken yüksek tarama hızlarında yüzey kapasitif (mor renk) baskın olmaktadır. Hazırlanan LSBLarın sahip olduğu yük depolama mekanizmasının daha net analiz edilebilmesi için Şekil 4'te yer alan farklı tarama hızlarındaki CV ölçümleri analiz edildi ve Şekil 5'de gösterilmektedir. Şekil 5'de tarama hızına bağlı olarak S/cZIF-8/Ti₃C₂ katotlar ile hazırlanan bataryaların yük depolama mekanizması analiz edilmiştir. Yüksek tarama hızında yüzey kapasitif ve düşük tarama hızlarında difüzyif katkının daha belirgin olduğu görülmüştür.

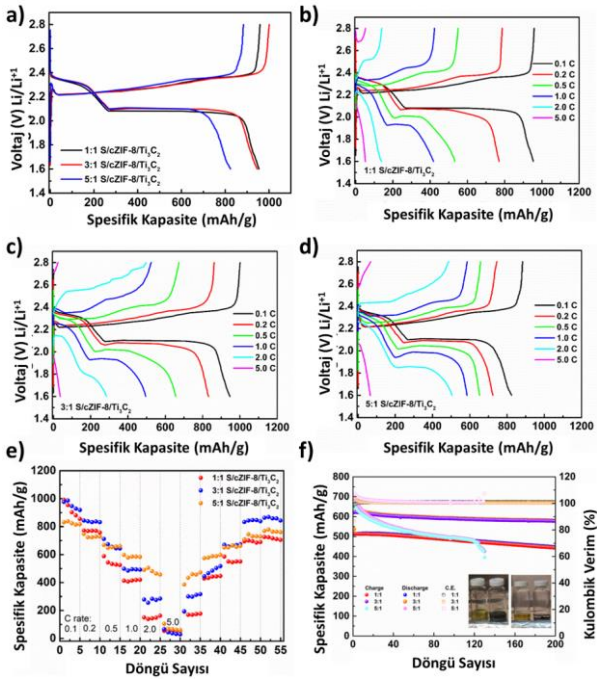


Şekil 5. Kütlece farklı oranlarda cZIF-8/Ti₃C₂ ile hazırlanan S/cZIF-8/Ti₃C₂ Li-S batarya katotlarının (a) 0,1 mV s⁻¹ ve (b) 0,5 mV s⁻¹ tarama hızlarındaki yük depolama mekanizması

Şekil 6(a)'da S/cZIF-8/Ti₃C₂ katotlar ile hazırlanan Li-S bataryaların 0,1 C-hızındaki GCD grafikleri yer almaktadır. Hazırlanan bataryalar deşarj sırasında yaklaşık 2,3 V ve 2,1 V bölgelerinde düz deşarj platolarına sahiptir. Kütlece 1:1 ve 3:1 S/cZIF-8/Ti₃C₂ katotları ile üretilen Li-S bataryalar 0,1 C-hızında yaklaşık 950-980 mAh/g spesifik kapasite değerlerine ulaşmıştır. Üretilen Li-S bataryaların galvanostatik şarj-deşarj (GCD) özelliklerini ve spesifik kapasitelerini belirlemek için farklı C-hızlarında GCD ölçümleri tekrarlanmıştır. S/cZIF-8/Ti₃C₂ katotlar ile

hazırlanan Li-S bataryaların farklı C-hızlarındaki GCD grafikleri Şekil 6(b)-(d)'de yer almaktadır.

GCD grafikleri yakından incelendiğinde spesifik kapasitelerin C-hızına bağlı olarak değiştiği görülmektedir. C-hızı yaklaşık 50 kat artarken (0,1-5,0 C) kapasite düşüşü ise nispeten sınırlı kalmaktadır. Farklı akım yoğunluklarında (0,1-5,0 C) gerçekleştirilen ölçümlerde ilk GCD ölçümlerinde kütlece 1:1 ve 3:1 S/cZIF-8/Ti₃C₂ katotları ile üretilen Li-S bataryalar yaklaşık 1000 mAh/g spesifik kapasite değerlerine ulaşmıştır. Diğer taraftan kütlece 5:1 oranındaki S/cZIF-8/Ti₃C₂ katodu ile hazırlanan Li-S batarya ise yaklaşık 820 mAh/g spesifik kapasite değerine ulaşmıştır. Şekil 6(e)'de C-hızına bağlı spesifik kapasite değişimi grafikleri yer almaktadır. Yüksek akım yoğunluklarında batarya cihazları doğal olarak bir miktar kapasite düşüşüne sahiptir, bu durum yavaş difüzyon kinetiğinden kaynaklanmaktadır. Üretilen Li-S batarya cihazları farklı akım yoğunluklarında yüksek hız yeteneği göstermişlerdir.



Şekil 6. (a) S/cZIF-8/Ti₃C₂ katotlar ile hazırlanan Li-S bataryaların 0,1 C-hızındaki GCD ölçümleri, (b)-(d) Kütlece farklı oranlarda cZIF-8/Ti₃C₂ içeren katotlar ile hazırlanan Li-S bataryaların farklı C-hızındaki GCD ölçümleri, (e) Üretilen Li-S bataryaların hız yetenekleri, (f) 1,0 C hızında kullanım ömrü ve kapasite korunumu (İnsert: Polisülfür adsorpsiyon testi referans ve cZIF-8/Ti₃C₂ çözeltiilerin 5 dakika ve 24 saat sonraki görüntüleri)

Sabit 1,0 C-hızında galvanostatik şarj deşarj ölçümleri S/cZIF-8/Ti₃C₂ katotlar ile hazırlanan Li-S bataryalar için de uygulanmıştır. Şekil 6(f)'de S/cZIF-8/Ti₃C₂ katotlar ile hazırlanan Li-S bataryaların 1,0 C hızında GCD çevrim sayısına bağlı spesifik kapasite değişimi grafiği görülmektedir. 200 GCD çevrim sayısında kütlece 3:1 cZIF-8/Ti₃C₂ içeren S katotlar diğer katotlara göre daha yüksek

elektrokimyasal performans ve kapasite korunumu göstermiştir.

Lityum polisülfür bileşiklerinin adsorplanma testi S/cZIF-8/Ti₃C₂ katotlar için de uygulanmıştır. cZIF-8/Ti₃C₂ kompozit yapıların elektrokimyasal prosesler sırasında oluşan çözünebilir polisülfür bileşiklerini adsorplama yeteneğini gözlemlemek için polisülfür adsorpsiyon testi gerçekleştirilmiştir. Şekil 6(f)'de sentezlenen kükürt tutucu elektrot aktif malzemesi kompozit yapının lityum polisülfürleri adsorbe etme performansları görülmektedir. Şekil 6(f)'de cZIF-8/Ti₃C₂ kompozitin güçlü bir adsorpsiyon yeteneğine sahip olduğu görülmektedir.

4 Sonuçlar

Çalışma kapsamında ıslak kimya yöntemi ile parametrik olarak üç farklı kütlece oranda nanokompozit yapı sentezlenmiş ve yapısal karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Yüksek yüzey alanına sahip iki boyutlu Ti₃C₂ MXene iletken yapılar üzerinde yüksek mikrogözenek hacmine sahip ZIF-8 MOF yapılar büyütülerek üç boyutlu nanokompozit yapılar üretilmiştir. Kütlece MOF miktarları arttıkça iki boyutlu Ti₃C₂ yüzeylerinde oluşan parçacıkların yoğunluğu ve morfolojileri de değişiklik göstermektedir.

Hazırlanan Li-S batarya cihazlarının elektrokimyasal ölçümleri halkalı voltametri ve galvanostatik şarj/deşarj ölçümleri ile gerçekleştirilmiştir. Üretilen nanokompozit katotların Li-S batarya uygulamalarında kullanım potansiyeline sahip olduğu görülmüştür. GCD ölçümlerinde kütlece 1:1 ve 3:1 S/cZIF-8/Ti₃C₂ katotları ile üretilen Li-S bataryalar yaklaşık 1000 mAh/g spesifik kapasite değerlerine ulaşmıştır. Kütlece 3:1 cZIF-8/Ti₃C₂ içeren katotlar 1,0 C hızında ve 200 GCD çevrim sayısında diğer katotlara göre daha yüksek elektrokimyasal performans ve kapasite korunumu göstermiştir. Üretilen cZIF-8/Ti₃C₂ nanokompozit malzemeler lityum-sülfür bataryalarda kükürt tutucu konak yapı olarak kullanıldığında yüksek hız yeteneği, kapasite korunumu ve ekonomik olma gibi özellikleri ile Li-S bataryaların enerji depolama alanındaki potansiyelini ortaya koymuştur.

Teşekkür

Bu çalışma Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FBG-2021-1703 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Araştırmacı desteklerinden dolayı ESOGÜ BAP koordinatörlüğüne teşekkür ederler.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] R. Yuksel, O. Buyukcakir, W.K. Seong, and R.S. Ruoff, Metal-Organic Framework Integrated Anodes for Aqueous Zinc-Ion Batteries, *Advanced Energy Materials* 10(16), 2020. <https://doi.org/10.1002/aenm.201904215>
- [2] R. Yuksel, O. Buyukcakir, P.K. Panda, S.H. Lee, Y. Jiang, D. Singh, S. Hansen, R. Adelung, Y.K. Mishra, R. Ahuja, and R.S. Ruoff, Necklace-like Nitrogen-

- Doped Tubular Carbon 3D Frameworks for Electrochemical Energy Storage, *Advanced Functional Materials* 30(10), 2020. <https://doi.org/10.1002/adfm.201909725>
- [3] H. Wang, Q.-L. Zhu, R. Zou, and Q. Xu, Metal-organic frameworks for energy applications, *Chem* 2(1), 52-80, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2016.12.002>
- [4] M. Zhao, B.-Q. Li, X.-Q. Zhang, J.-Q. Huang, and Q. Zhang, A Perspective toward Practical Lithium–Sulfur Batteries, *ACS Central Science* 6(7) 1095-1104, 2020. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.0c00449>
- [5] Q. Pang, X. Liang, C.Y. Kwok, and L.F. Nazar, Advances in lithium–sulfur batteries based on multifunctional cathodes and electrolytes, *Nature Energy* 1(9), 16132, 2016. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.132>
- [6] J. Lim, J. Pyun, and K. Char, Recent approaches for the direct use of elemental sulfur in the synthesis and processing of advanced materials, *Angewandte Chemie International Edition* 54(11), 3249-3258, 2015. <https://doi.org/10.1002/anie.201409468>
- [7] H.F. Schaeffer, and G.D. Palmer, Plastic and allotropic forms of sulfur, *Journal of Chemical Education* 17(10), 473, 1940. <https://doi.org/10.1021/ed017p473>
- [8] D.A. Boyd, Sulfur and its role in modern materials science, *Angewandte Chemie International Edition* 55(50) 15486-15502, 2016. <https://doi.org/10.1002/anie.201604615>
- [9] R. Fang, S. Zhao, Z. Sun, D.-W. Wang, H.-M. Cheng, and F. Li, More Reliable Lithium-Sulfur Batteries: Status, Solutions and Prospects, *Advanced Materials* 29(48) 1606823, 2017. <https://doi.org/10.1002/adma.201606823>
- [10] M. Rana, S.A. Ahad, M. Li, B. Luo, L. Wang, I. Gentle, and R. Knibbe, Review on areal capacities and long-term cycling performances of lithium sulfur battery at high sulfur loading, *Energy Storage Materials* 18, 289-310, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2018.12.024>
- [11] L. Huang, J. Li, B. Liu, Y. Li, S. Shen, S. Deng, C. Lu, W. Zhang, Y. Xia, G. Pan, X. Wang, Q. Xiong, X. Xia, and J. Tu, Electrode Design for Lithium–Sulfur Batteries: Problems and Solutions, *Advanced Functional Materials* 30(22), 1910375, 2020. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adfm.201910375>
- [12] T. Qiu, Z. Liang, W. Guo, H. Tabassum, S. Gao, and R. Zou, Metal–Organic Framework-Based Materials for Energy Conversion and Storage, *ACS Energy Letters* 5(2), 520-532, 2020. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.9b02625>
- [13] M. Rana, H.A. Al-Fayaad, B. Luo, T. Lin, L. Ran, J.K. Clegg, I. Gentle, and R. Knibbe, Oriented nanoporous MOFs to mitigate polysulfides migration in lithium-sulfur batteries, *Nano Energy* 75, 105009, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105009>
- [14] S.-D. Seo, D. Park, S. Park, and D.-W. Kim, “Brain-Coral-Like” Mesoporous Hollow CoS₂@N-Doped Graphitic Carbon Nanoshells as Efficient Sulfur Reservoirs for Lithium–Sulfur Batteries, *Advanced Functional Materials* 29(38), 1903712, 2019. <https://doi.org/10.1002/adfm.201903712>
- [15] X. Ji, K.T. Lee, and L.F. Nazar, A highly ordered nanostructured carbon–sulphur cathode for lithium–sulphur batteries, *Nature Materials* 8(6), 500-506, 2009. <https://doi.org/10.1038/nmat2460>
- [16] H. Kim, J. Lee, H. Ahn, O. Kim, and M.J. Park, Synthesis of three-dimensionally interconnected sulfur-rich polymers for cathode materials of high-rate lithium–sulfur batteries, *Nature Communications* 6(1), 7278, 2015. <https://doi.org/10.1038/ncomms8278>
- [17] J. Tang, R.R. Salunkhe, J. Liu, N.L. Torad, M. Imura, S. Furukawa, and Y. Yamauchi, Thermal Conversion of Core–Shell Metal–Organic Frameworks: A New Method for Selectively Functionalized Nanoporous Hybrid Carbon, *Journal of the American Chemical Society* 137(4), 1572-1580, 2015. <https://doi.org/10.1021/ja5111539a>
- [18] G. Li, X. Jiang, C. Liu, M. Song, S. Yang, J. Lian, and J.Y. Lee, A microporous carbon derived from metal-organic frameworks for long-life lithium sulfur batteries, *International Journal of Energy Research* 44(3), 2126-2136, 2020. <https://doi.org/10.1002/er.5070>
- [19] B. Guan, Y. Zhang, L. Fan, X. Wu, M. Wang, Y. Qiu, N. Zhang, and K. Sun, Blocking Polysulfide with Co₂B@ CNT via “Synergetic Adsorptive Effect” toward Ultrahigh-Rate Capability and Robust Lithium–Sulfur Battery, *ACS Nano* 13(6), 6742-6750, 2019. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b01329>
- [20] K. Li, M. Liang, H. Wang, X. Wang, Y. Huang, J. Coelho, S. Pinilla, Y. Zhang, F. Qi, and V. Nicolosi, Y. Xu, 3D MXene Architectures for Efficient Energy Storage and Conversion, *Advanced Functional Materials* 30(47), 2000842, 2020. <https://doi.org/10.1002/adfm.202000842>
- [21] X. Liang, A. Garsuch, and L.F. Nazar, Sulfur cathodes based on conductive MXene nanosheets for high-performance lithium–sulfur batteries, *Angewandte Chemie International Edition* 127(13), 3979-3983, 2015. <https://doi.org/10.1002/anie.201410174>
- [22] Q. Zhao, Q. Zhu, J. Miao, P. Zhang, and B. Xu, 2D MXene nanosheets enable small-sulfur electrodes to be flexible for lithium–sulfur batteries, *Nanoscale* 11(17) 8442-8448, 2019. <https://doi.org/10.1039/C8NR09653H>
- [23] M. Naguib, M. Kurtoglu, V. Presser, J. Lu, J. Niu, M. Heon, L. Hultman, Y. Gogotsi, and M.W. Barsoum, Two-Dimensional Nanocrystals Produced by Exfoliation of Ti₃AlC₂, *Advanced Materials* 23(37), 4248-4253, 2011. <https://doi.org/10.1002/adma.20110230>





Arazi kullanımı ve arazi örtüsü belirleme çalışmalarında nesne tabanlı ve piksel tabanlı sınıflandırma yöntemlerinin karşılaştırılması: Yedigöze Baraj Gölü ve çevresi örneği

Comparison of object based and pixel based classification methods in land use and land cover determination studies: The case of Yedigoze Reservoir Area

Sevim Yasemin Çiçekli^{1,*} 

¹ Çukurova Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 01330, Adana Türkiye

Öz

Uydu tekniklerinin gelişmesiyle birlikte, AKAÖ (Arazi Kullanımı ve Arazi Örtüsü) belirlemek amacıyla uydu görüntüleri ve görüntü sınıflandırma algoritmaları daha sık kullanılmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı Yedigöze Baraj Gölü çevresinde nesne tabanlı ve piksel tabanlı görüntü sınıflandırma yöntemleri ile sınıflama işlemini gerçekleştirmek ve sınıflama tekniklerinin genel doğruluklarını karşılaştırmaktır. Bu çalışmada Yedigöze Baraj Gölü'nün 24 Haziran 2023 tarihinde alınan Sentinel-2B uydu görüntüsü kullanılmıştır. İlk olarak görüntü, DVM (Destek Vektör Makineleri), YSA (Yapay Sinir Ağları) ve MOS (Maksimum Olabilirlik Sınıflandırması) yöntemiyle piksel tabanlı sınıflandırma yöntemiyle sınıflandırılmıştır. Daha sonra görüntü, KEYK (K-En Yakın Komşuluk) yöntemiyle nesne tabanlı sınıflandırma yöntemiyle sınıflandırılmıştır. Bu algoritmalar kullanılarak su alanı, tarım alanı, orman alanı ve yerleşim alanı olmak üzere dört sınıf belirlenmiştir. Genel doğruluklar DVM yöntemi için %92.92, YSA yöntemi için %92.42, MOS yöntemi için %86.71 ve KEYK yöntemi için %93.18 olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, olarak, tüm yöntemlerin yüksek doğruluk sağladığı ve nesne tabanlı KEYK yönteminin diğer sınıflandırma yöntemlerine göre daha yüksek doğruluk sağladığı tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Destek vektör makineleri, Yapay sinir ağları, Maksimum olabilirlik sınıflandırması, K-en yakın komşuluk, Uzaktan algılama

1 Giriş

Uzaktan algılama teknolojisi AKAÖ haritaları oluşturmak, arazi kullanımı ve arazi örtüsü değişikliklerini tespit etmek, sulak alan yönetimi, ekolojik çalışmalar ve doğal afetlerin izlenmesi için yıllar içinde yaygın olarak kullanılmıştır. Nüfus artışı ile birlikte sulak alanların gözlemlenmesi ve su yönetimi büyük önem kazanmıştır. Su alanları ve çevresinde, arazi kullanımı ve arazi örtüsü haritaları, gözlem ve takip açısından sınıflandırma algoritmaları kullanılarak oluşturulabilir ve izlenebilir. Görüntü sınıflandırma temel olarak piksel tabanlı ve nesne tabanlı olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır. Uzaktan algılama çalışmalarında, piksel tabanlı sınıflandırma tekniği sıklıkla kullanılırken, piksel tabanlı sınıflandırma yöntemine

Abstract

With the development of satellite techniques, satellite images and image classification algorithms are used more frequently to determine LULC (Land Use and Land Cover). The main purpose of this study is to perform the classification process with object-based and pixel-based image classification methods in the Yedigöze Reservoir area and to compare the general accuracies of the classification techniques. In this study, Sentinel -2B satellite image of Yedigöze Reservoir taken on June 24, 2023 was used. First, the image was classified by pixel-based classification using SVM (Support Vector Machines), ANN (Artificial Neural Networks) and MLC (Maximum Likelihood Classification) method. Then, the image was classified by object-based classification using the KNN (K-Nearest Neighbor) method. Using these algorithms, four classes were determined: water area, agricultural area, forest area and residential area. Overall accuracies were calculated as 92.92% for the SVM method, 92.42% for the ANN method, 86.71% for the MLC method and 93.18% for the KNN method. As a result of the study, it has been determined that all methods provide high accuracy and the object-based KNN method provides higher accuracy than other classification methods.

Keywords: Support vector machines, Artificial neural networks, Maximum likelihood classification, K-nearest neighbor, Remote sensing

alternatif olarak nesne tabanlı sınıflama yöntemi geliştirilmiş ve kullanılmıştır.

Literatür incelendiğinde nesne tabanlı sınıflandırma tekniği ile piksel tabanlı görüntü sınıflandırmanın doğruluklarını karşılaştırmak amacıyla yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Gholoobi, Tayyebi, Taleyi ve Tayyebi [1] tarafından dağlık bölgelerde arazi kullanımı /arazi örtüsünü belirlemek için yapılan çalışmada piksel tabanlı ve nesne tabanlı sınıflandırma tekniklerini kullanılarak, kullanılan nesne tabanlı sınıflandırma yönteminin, piksel tabanlı sınıflama yönteminden daha doğru sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Nesne tabanlı sınıflandırma yönteminin %87.38 genel doğruluk, piksel tabanlı sınıflama yöntemi %74.38 genel doğruluk

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: s.y.cicekli@gmail.com (S. Y. Çiçekli)

Geliş / Received: 26.04.2024 Kabul / Accepted: 29.08.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1472869

sağlamıştır. Kalkan ve Maktav [2] tarafından yapılan çalışmada piksel tabanlı sınıflandırma ve nesne tabanlı sınıflandırma yöntemlerini karşılaştırılmış ve nesne tabanlı sınıflandırma tekniğinin, piksel tabanlı sınıflama tekniğine göre daha yüksek doğruluğa sahip olduğunu tespit edilmiştir. Nesne tabanlı sınıflandırma tekniği %98.39 genel doğruluk, piksel tabanlı sınıflama tekniği %92.91 genel doğruluk sağlamıştır. Zhang vd. [3] tarafından yapılan çalışmada Heine Nehri havzasında Spot-5 görüntülerini kullanarak nesne tabanlı sınıflandırma gerçekleştirilmiştir. Nesne tabanlı sınıflandırmanın %94 genel doğruluk ile sonuç verdiğini gözlemlenmiştir. Al Fugara vd. [4] tarafından yapılan çalışmada Landsat-7 görüntülerini kullanarak Malezya'nın Klong vadisinde piksel tabanlı ve nesne tabanlı sınıflandırma gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda nesne tabanlı sınıflandırma yönteminin daha yüksek doğruluk sağladığı tespit edilmiştir. Nesne tabanlı sınıflandırma tekniği %89.78 genel doğruluk, piksel tabanlı sınıflama tekniği %70.24 genel doğruluk sağlamıştır. Deilmai vd. [5] tarafından yapılan çalışmada Malezya'da AKAÖ belirlemek için MOS ve DVM sınıflandırma yöntemlerinin doğruluklarını karşılaştırılmıştır, MOS sınıflandırma yönteminin %78, DVM sınıflandırma yönteminin %91 doğruluk sağladığı tespit edilmiştir. Yaban vd. [6] tarafından yapılan çalışmada orman alanlarında arazi örtüsü belirlemek için DVM ve MOS sınıflandırma yöntemlerini kullanılmış ve doğruluk analizi yapılmıştır, MOS yönteminin %70, DVM yönteminin %80 doğruluk sağladığı tespit. Yuh vd. [7] tarafından yapılan çalışmada arazi örtüsü belirlemek için Rastgele Orman (RO), DVM, YSA ve KEYK sınıflandırma yöntemlerini kullanılmış, KEYK sınıflandırma yöntemi %89.7, DVM sınıflandırma yöntemi %89, YSA sınıflandırma yöntemi %84, RO sınıflandırma yöntemi %99 doğruluk sağladığı tespit edilmiştir. Kavzoğlu ve Çölkesen [8] tarafından gerçekleştirilen çalışmada DVM'lerin sınıflandırma performansının kernel fonksiyonu ve parametre değerlerine bağlı olarak analiz edilmiştir. Çalışmada kullanılan veri seti için radyal tabanlı fonksiyon ve Pearson VII fonksiyon kernellerinin %94'ün üzerinde genel doğruluk sağlayarak en iyi performans gösteren yöntemler olduğu belirlenmiştir. Gümüş ve Durduran [9] tarafından gerçekleştirilen çalışmada Konya Kapalı Havzası içinde Beyşehir-Kaşaklı Alt Havzası'nda arazi kullanımı ve arazi örtüsünde meydana gelen zamansal değişim araştırılmıştır. 1984-2018 yılları arasındaki dönem incelenmiş ve DVM sınıflandırma işlemi sonucunda yapay yüzeylerin %418 oranında arttığı, ekilebilir tarım arazileri ve meraların %14 oranında azaldığı, ormanlar ve yarı doğal alanlar %4 ve kıyıldaki kıyı sulak alanları ise %6 arttığı tespit edilmiştir. Akar ve Güngör [10] tarafından gerçekleştirilen çalışmada kırsal ve kentsel alana ait QuickBird uydu görüntüsüne RO, DVM, Gentle AdaBoost (GAB), En Çok Benzerlik (EÇB) yöntemleri uygulanarak, yöntem doğrulukları karşılaştırılmıştır. En yüksek doğruluğu veren yöntem RO, DVM yönteminden kırsalda %11, kentsel alanda %10 daha iyi sonuç sağlamıştır. Doğan ve Buğday [11] tarafından gerçekleştirilen çalışmada Kastamonu ili 1999-2016 yılları arasında LULC değişimini tespit etmek için YSA piksel tabanlı sınıflama yöntemini kullanılmış,

sınıflandırma işlemleri 1999 ve 2016 yılları için sırasıyla %82 ve %84 oranlarıyla gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmanın temel amacı piksel tabanlı ve nesne tabanlı sınıflama yöntemlerinin, su alanları çevresinde AKAÖ belirlemek amacıyla kullanımında doğruluklarının araştırmaktır. Yedigöze barajı ve çevresinde, su yapıları, yerleşim alanları, tarım arazileri ve orman alanları bir arada bulunduğu için çalışma alanı olarak seçilmiştir. Sentinel-2B görüntülerinin analizi ile Yedigöze Barajı ve çevresinde AKAÖ belirlenmesi amacıyla piksel tabanlı sınıflandırma yöntemi olarak YSA, DVM ve MOS algoritması ve nesne tabanlı sınıflandırma tekniği olarak KEYK seçilmiş, su alanı, tarım alanı, orman ve yerleşim alanı olmak üzere dört sınıf oluşturulmuş, bu yöntemlerin doğrulukları kontrol noktaları kullanılarak analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın "1. Giriş" bölümünde literatür çalışmalarına yer verilerek, çalışmanın temel amacı açıklanmıştır. "2. Materyal ve Metot" bölümünde, çalışma alanının konumu, kullanılan Sentinel-2B uydu görüntüsünün bantlarının ve özellikleri, çalışmada kullanılan görüntü sınıflama yöntemleri açıklanmıştır. "3. Bulgular ve tartışma" bölümünde, uydu görüntüsüne uygulanan ön işleme aşaması, sınıflama teknikleri kullanılarak oluşturulan sınıflama haritaları görüntüleri, her bir sınıf için hesaplanan piksel sayıları ve alanlar, hata matrisleri kullanılarak belirlenen doğruluk değerleri yer almaktadır. "4. Sonuç" bölümünde çalışma sonunda elde edilen tüm sonuçlar açıklanmıştır.

2 Materyal ve metot

2.1 Çalışma alanı

Yedigöze Barajı, hidroelektrik üretimi ve sulama amacıyla, 2007 yılında inşa edilmeye başlanmış ve 2010 yılında kullanıma açılmıştır. Yedigöze Barajı ve Hidroelektrik Santrali, Adana İl'inin kuzeyinde İmamoğlu ve Aladağ ilçeleri arasında, 37°24'05.42"N 35°26'43.07"E koordinatlarında yer almaktadır. Yedigöze Baraj Gölü etrafında ormanlık alanlar bulunmaktadır. Hem içerisinde su yapısı bulundurması hem de orman alanlarının bulunması nedeniyle, Yedigöze Baraj Gölü ve çevresi çalışma alanı olarak seçilmiştir. Çalışma alanı Şekil 1'de sunulmuştur.

2.2 Materyal

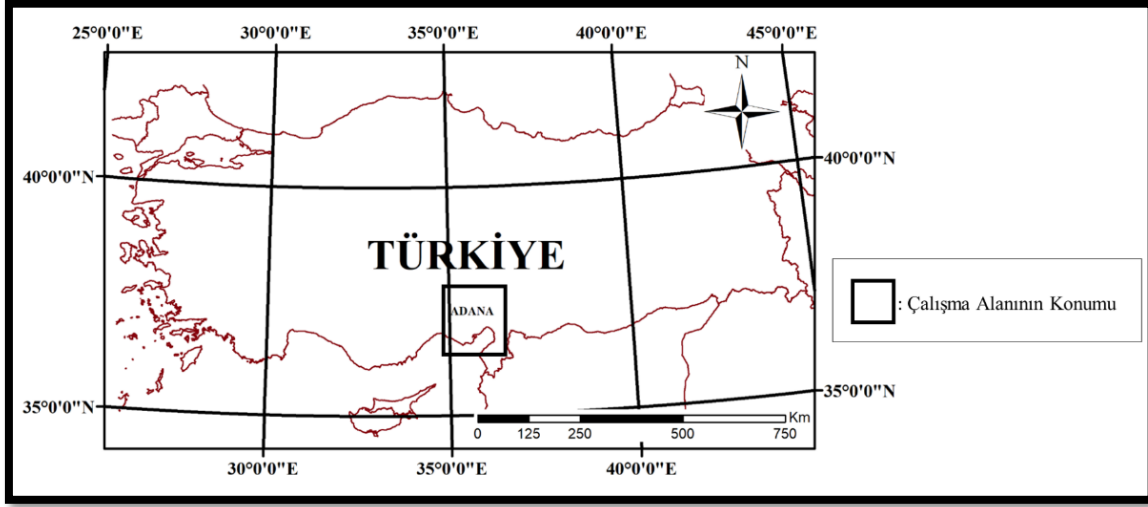
Bu çalışmada Yedigöze Barajı'nın 24 Haziran 2023 tarihinde algılanmış Sentinel-2B uydu görüntüsü kullanılmıştır. Sentinel-2B görüntüleri, AUA (Avrupa Uzay Ajansı) web sayfasından temin edilmiştir [12]. Tablo 1'de Sentinel-2B uydusunun bantlarının özellikleri yer almaktadır.

Çalışmada Sentinel-2B uydu görüntüsüne ait 10 metre çözünürlüğe sahip bant-2 (mavi), bant-3 (yeşil) ve bant-4 (kırmızı) kullanılmıştır.

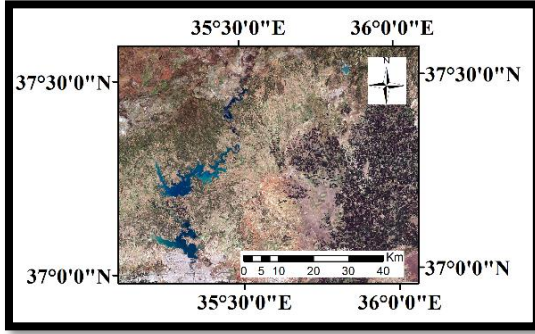
2.3 Metot

2.3.1 Destek vektör makineleri (Support vector machines, DVM)

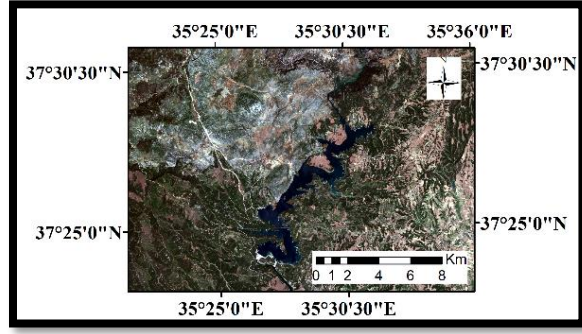
Kontrollü bir sınıflandırma tekniği olan DVM aynı zamanda bir öğrenme tekniğidir. Bu algoritma, bir hiper



(a)



(b)



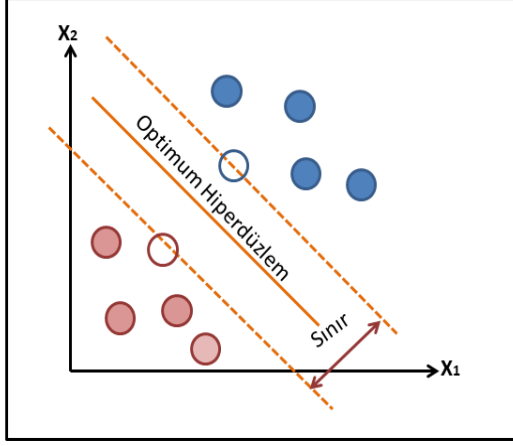
(c)

Şekil 1. (a) Çalışma alanının konumu (b) çalışma alanı ve çevresine ait Sentinel-2B uydu görüntüsü (c) çalışma alanı [12,13]

Tablo 1. Sentinel-2B bantları ve özellikleri

Sentinel-2 Uydu Bantları	Özellikler	
	Dalgaboyu (mikrometre)	Çözünürlük(m)
Bant-1 (Kıyı Aerosol)	0.442	60
Bant-2 Mavi	0.492	10
Bant-3 Yeşil	0.559	10
Bant-4 Kırmızı	0.665	10
Bant-5 Bitki Örtüsü Kırmızı Kenar	0.703	20
Bant-6 Bitki Örtüsü Kırmızı Kenar	0.739	20
Bant-7 Bitki Örtüsü Kırmızı Kenar	0.779	20
Bant-8 NIR	0.833	10
Bant-8A Bitki Örtüsü Kırmızı Kenar	0.864	20
Bant-9 Su Buharı	0.943	60
Bant-10 SWIR Cirrus	1.376	60
Bant-11 SWIR	1.610	20
Bant-12 SWIR	2.185	20

düzlem olarak veri setini, bir dizi etiketli veri örneği kullanarak, önceden tanımlanmış bir sayıda sınıfa ayırmayı amaçlar [14]. DVM yönteminin yapısı Şekil 2’te sunulmuştur.



Şekil 2. DVM yönteminin yapısı [15]

$x \in R^N$ N boyutlu bir uzay ve $y \in \{-1+1\}$ olduğu için veri kümeleri $\{x_i, y_i\}$ ($i=1, \dots, k$)’dir. X, hiper düzlemde bir nokta olduğundan, bu hiper düzlem Denklem (1)’de tanımlanmıştır.

$$w \times x_i + b = 0 \quad (1)$$

İki sınıf için ayırıcı bir hiper düzlem tanımlanması Denklem (2), Denklem (3)’de sunulmuştur.

$$y = 1 \text{ için } w \times x_i + b \geq 1 \quad (2)$$

$$y = -1 \text{ için } w \times x_i + b \leq 1 \quad (3)$$

2.3.2 Maksimum olabirlik sınıflandırması (Maximum likelihood classification, MOS)

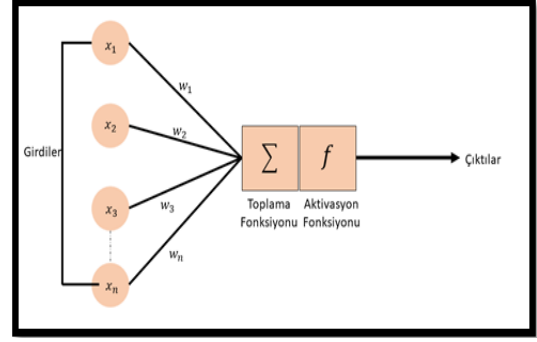
MOS, belirli bir istatistik için bilinen bir sınıf dağılımını maksimum olarak belirlemeye yönelik bir yöntemdir [16]. Uzaktan algılamada yaygın olarak kullanılan MOS, bir pikselin maksimum olasılığa karşılık gelen sınıfa atandığı bir piksel tabanlı sınıflama yöntemidir [17]. Matematiksel formülü Denklem (4)’de tanımlanmıştır.

$$P(X) = \ln(a_c) - [0.5x \ln(|S_x|)] - [0.5x(x - m_c)T_x(S_x^{-1})x(x - m_c)] \quad (4)$$

P olasılık değeridir, C örnek bir sınıfı temsil eder. x aday pikselin ölçüm vektörü, M sınıfın ortalama değeri, a aday pikselin sınıfa ait olma yüzdesi ve S_x varyans-kovaryans matrisi olarak tanımlanır [18].

2.3.3 Yapay sinir ağları (Artificial neural networks, YSA)

YSA, nöronlardan oluşan ve karmaşık ortamlarda tahmin etme ve tahmin için yararlı olan matematiksel bir modelleme aracıdır [19, 20]. Temel birimi nöronlar olup, nöronun yapısı Şekil 3’de sunulmuştur.



Şekil 3. Nöronun yapısı [20]

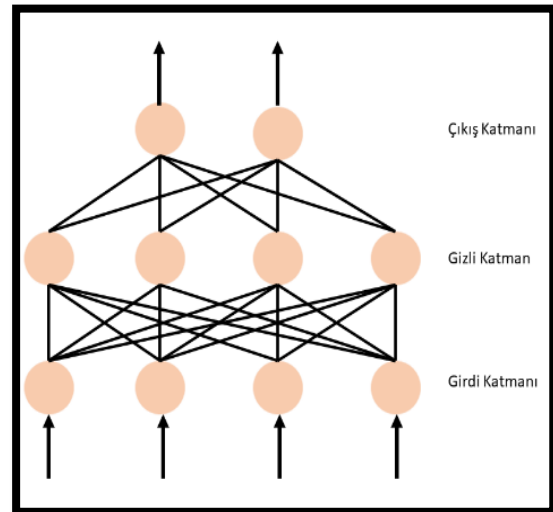
$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ girdiler, $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ bu girdilerin ağırlıklarıdır. Ağırlıklar girdilerin hücre üzerindeki etkisini belirler. Toplama fonksiyonu hücreye giren net girdiyi hesaplar. Bu matematiksel olarak Denklem (5)’de verildiği gibi tanımlanabilir [21].

$$Net\ Veri = \sum x_i w_i \quad (5)$$

Aktivasyon fonksiyonu Denklem (6)’de verildiği gibi tanımlanabilir.

$$y = F(x) \quad (6)$$

YSA, üç ana bölümden oluşur: Giriş katmanı dışarıdan gelen verileri alır ve gizli katmana aktarır. Gizli katman, giriş katmanından gelen verileri ağırlıkla çarparak verileri çıkış katmanına aktarır. Çıkış katmanı sonucu dışarıya gönderir [21]. YSA katmanları Şekil 4’te gösterilmiştir.



Şekil 4. YSA katmanları

2.3.4 K en yakın komşuluk yöntemi (K-nearest neighbor, KEYK)

KEYK yöntemi, nokta ile diğer değişkenler arasındaki benzerliklere dayanarak tahminde bulunan parametrik

olmayan bir yaklaşımdır [22]. KEYK nesne tabanlı bir sınıflandırma yöntemidir. Nesne tabanlı sınıflandırmanın ilk adımı segmentasyondur. Bu çalışmada çoklu çözünürlüklü segmentasyon kullanılmıştır. Çoklu çözünürlüklü segmentasyon algoritması bir birleştirme tekniğidir. Bireysel pikseller birden fazla düzeyde giderek daha büyük bölümler halinde toplanır. Üç parametreye dayanır: ölçek, şekil ve kompaktlık [23]. Bu yöntem tek görüntü nesnelere tanımlar ve homojenlik kriterine göre pikselleri komşularıyla birleştirir. Bu homojen kriterler, spektral ve şekil kriterlerinin birleşimidir. Ölçek parametresi görüntüde oluşacak olan segmentlerin ortalama boyutunu belirleyen değerdir. Çoklu çözünürlüklü segmentasyon aşamasında, ölçek parametresi, renk/şekil parametresi ve kompaktlık parametreleri çalışma alanına en uygun seçilmesi doğruluk açısından çok önemlidir. Renk/şekil ve kompaktlık parametreleri birbirini 1'e tamamlar [24].

KEYK algoritmasında ölçülen sonuçlara dayalı olarak stabil bir veri tabanı (D) oluşturulur. K en yakın komşu numarası belirlenir. Özellik vektörü olan M ($m_1, m_2 \dots m_n$) her nokta için hesaplanır ve üretilir. M' ve D koleksiyonunun her noktası arasındaki mesafeler (M): dist (M', M) belirlenirken yaygın olarak kullanılan Öklid Uzaklığı Denklem (7)'de sunulmuştur [25].

$$d(M', M) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (m_i - m_j)^2} \quad (7)$$

Hesaplanan mesafeye göre en yakın K noktası D seçilir ve yukarıdaki denkleme (D_k) göre yeni bir veri toplanır. M'nin çıkış değeri Denklem (8)'kullanılarak D_k 'ye göre hesaplanır.

$$M' = \frac{\sum_{i=1}^K M_j}{K} \quad (8)$$

3 Bulgular ve tartışma

Kullanılan Sentinel-2B görüntüleri, LIC serisi olduğundan ve atmosferik düzeltmeleri yapılmış halde sunulduğundan dolayı, ön işleme aşamasında yalnızca görüntülerin kesilmesi işlemi yapılmıştır. İş akış diyagramı Şekil 5'te sunulmuştur.

Nesne tabanlı sınıflama aşamasında çoklu çözünürlüklü segmentasyon kullanılmıştır. Çalışmada farklı ölçek parametreleri denenmiş, parametre değerleri deneysel olarak seçilmiştir. Bu işlem gerçekleştirilirken şekil parametresi 0.1, kompaktlık parametresi 0.5, ölçek parametresi ise 80 olarak seçilerek çoklu çözünürlüklü segmentasyon gerçekleştirilmiştir. Çoklu çözünürlüklü segmentasyon uygulanmış görüntülere KEYK yöntemi ile nesne tabanlı sınıflama işlemi uygulanmıştır. KEYK uygulanırken komşuluk parametresi K, 1 olarak seçilmiştir. Çoklu çözünürlüklü segmentasyon uygulanmış görüntü ve KEYK yöntemi ile elde edilmiş sınıflama görüntüsü Şekil 6'de sunulmuştur.

DVM sınıflandırma yöntemi, kullanılan veri setleri doğrusal yapıya sahip ise sınıflandırılma yapılırken lineer

fonksiyonları kullanırken, uzaktan algılanmış görüntüler gibi doğrusal olmayan veri setleri olması durumunda kernel fonksiyonlarını kullanmaktadır [26]. Radyal tabanlı kernel fonksiyonu, yüksek sınıflandırma doğruluğu üretmesi nedeniyle DVM yöntemi uygulanırken en çok tercih edilen fonksiyon olma özelliğine sahiptir [8-26-27]. Radyal tabanlı kernel fonksiyonu Denklem (9)'de sunulmuştur.

$$K = (x_i x_j) = \exp(-\gamma \|x - y\|^2) \quad \gamma > 0 \quad (9)$$

Bu çalışmada DVM yöntemi uygulanırken Radyal tabanlı kernel fonksiyonu kullanılmıştır. Kernel fonksiyonu parametresinin (γ) ve C ceza parametresinin seçimi doğruluk açısından önemlidir. Buradaki C parametresi, iki düzlem arasındaki mesafeyi maksimum da tutarken esneme payını kabul edilebilir seviyede tutmak için kullanılan ceza faktörü olarak tanımlanmaktadır [28]. Bu parametrelerin seçiminde, grid arama yöntemi kullanılabilir. Grid arama yönteminde, parametreler için alt, üst sınır ve değer aralığı belirlenir, en iyi sınıflandırma performansını gösteren değerler parametre değerleri olarak kabul edilir [28]. Bu çalışmada γ parametresi, 0.333 ve C parametresi 100 olarak seçilmiştir.

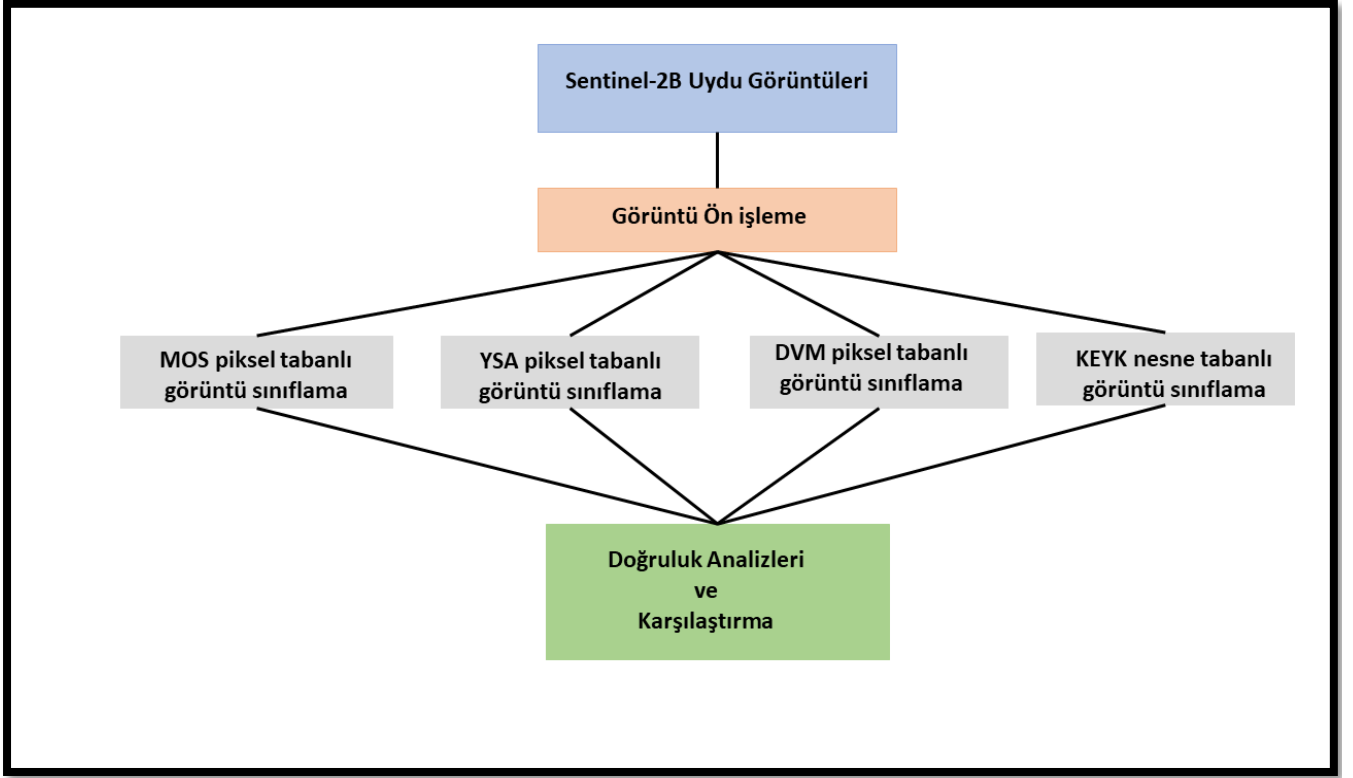
YSA yöntemi uygulanırken bir adet gizli katman kullanılarak, 100 iterasyon ile sınıflama işlemi gerçekleştirilmiştir. MOS, DVM ve YSA yöntemleri kullanılarak piksel tabanlı sınıflama işlemi gerçekleştirilmiş ve MOS, DVM, YSA sınıflama görüntüsü Şekil 7'de sunulmuştur.

MOS, YSA, DVM ve KEYK yöntemleri ile hesaplanan sınıf alanları Tablo 2'de sunulmuştur.

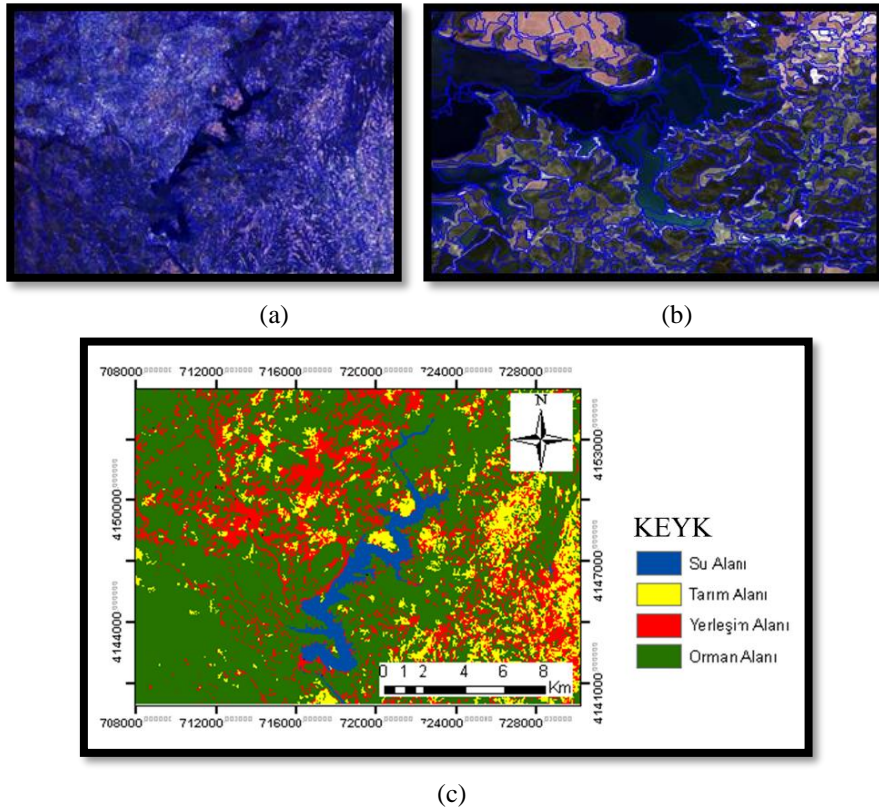
Tablo 2. MOS, YSA, DVM ve KEYK yöntemleri ile gerçekleştirilen sınıflama işlemi sonucu oluşturulmuş her sınıf için hesaplanan alanlar

	YSA (km ²)	DVM (km ²)	MOS(km ²)	KEYK (km ²)
Tarım alanı	54.3709	51.7583	40.1362	47.8719
Orman alanı	219.7825	226.4652	182.8332	231.8243
Yerleşim alanı	75.8512	71.6062	127.2243	70.3158
Su alanı	13.3758	13.5507	13.1867	13.3684
Toplam	363.3804	363.3804	363.3804	363.3804

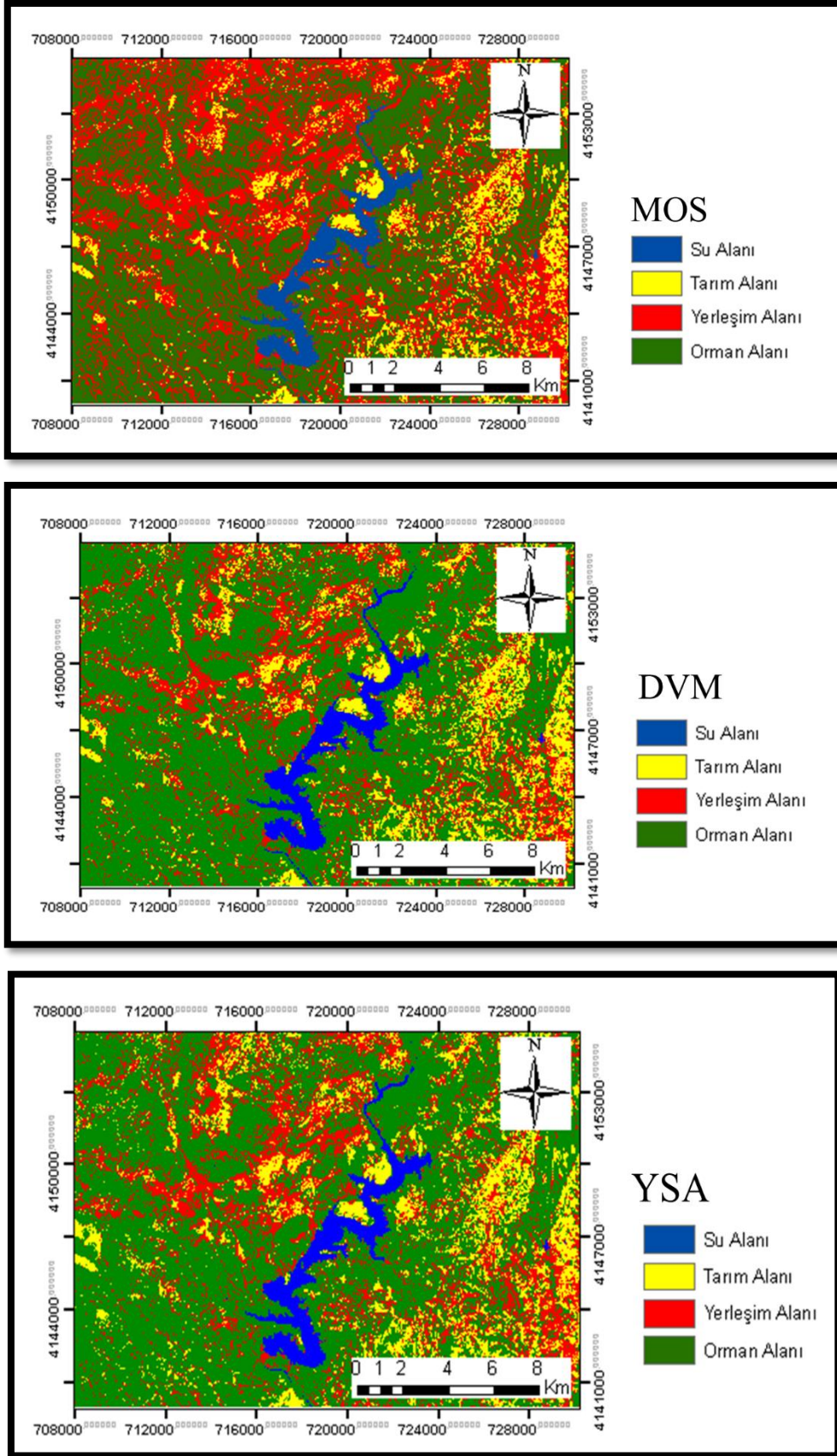
Çalışma alanında, 100 adet kontrol noktası random olarak seçilmiştir. Bu noktalar, test alanlarının belirlenmesinde kullanılmıştır. Test alanları, arazi üzerinde yapılan gözlemler ve Google Earth Engine [29] yazılımı da kullanılarak oluşturulmuştur. Nokta sayısı literatürdeki çalışmalara göre seçilmiştir. Makineci ve Akosman [30] tarafından yapılan çalışmada kontrollü sınıflandırma doğruluk analizi, rastgele üretilmiş olan 100 adet test noktası ile yapılmıştır. Çiçekli [31] tarafından yapılan çalışmada random olarak üretilmiş 300 noktanın %30 u test verisi olarak kullanılmıştır. Noktaların dağılımı Şekil 8'de sunulmuştur. Oluşturulan hata matrisleri Şekil 9 'da sunulmuştur.



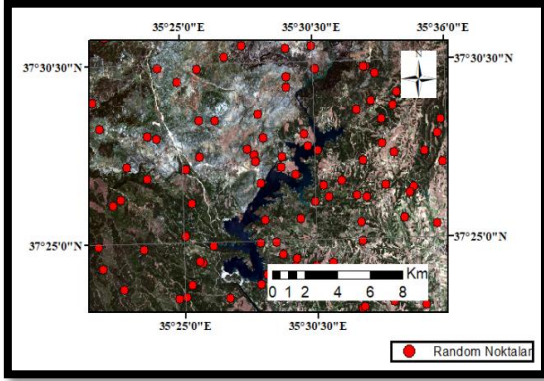
Şekil 5. İş akış diyagramı



Şekil 6. (a) ve (b) Çoklu çözünürlüklü segmentasyonu uygulanmış görüntüler (c) KEYK sınıflama haritası



Şekil 7. MOS, DVM ve YSA sınıflama haritaları



Şekil 8. Kontrol noktaları

MOS, YSA, DVM ve KEYK yöntemleri ile gerçekleştirilen sınıflama işlemlerinin genel doğrulukları Tablo 3'de, sınıflama üretici ve kullanıcı doğrulukları Tablo 4'de sunulmuştur.

Tablo 3. MOS, YSA, DVM ve KEYK yöntemleri ile gerçekleştirilen sınıflamaların genel doğrulukları

Yöntem	Genel Doğruluk (%)	Kappa
MOS	86.71	0.7744
YSA	92.42	0.8709
DVM	92.92	0.8678
KEYK	93.18	0.8990

MOS, YSA, DVM ve KEYK yöntemleri yüksek doğruluklu sonuçlar vermiştir. KEYK nesne tabanlı sınıflama yönteminin diğer yöntemlere göre daha yüksek doğruluk sağladığı gözlemlenmiştir.

Doğruluk sonuçları incelendiğinde, piksel tabanlı sınıflama yöntemlerinde tarım alanları ve yerleşim alanlarının doğrulukları daha düşüktür, yöntemlerin en çok tarım alanları ve yerleşim alanları birbirinden ayırmakta zorlandığı görülmektedir. Bunun nedeni yöntemlerin ekili olmayan tarım arazilerinin, yerleşim alanlarını ayırt etmekte başarısız olmasıdır. Nesne tabanlı sınıflama yöntemi segmentler oluşturularak sınıflama yaptığı için, piksel tabanlı sınıflama yöntemlerinden daha yüksek doğruluk sağlamıştır.

KEYK Nesne tabanlı sınıflandırma yöntemi, YSA, DVM ve MOS piksel tabanlı sınıflama tekniklerinden farklı olarak, sadece görüntüdeki spektral değeri değil, komşuluk özelliklerini de kullandığı için sınıflandırma işlemi yüksek doğrulukla gerçekleştirilmiştir. Literatürdeki nesne tabanlı

ve piksel tabanlı sınıflandırma tekniklerini kullanan arazi kullanımı ve arazi örtüsü çalışmaları incelendiğinde [1, 2, 3-4] nesne tabanlı sınıflama tekniği ile daha iyi bir sınıflama doğruluğu elde ederek harita yapımı gerçekleştirilmiştir. Literatürdeki çalışmalarda elde edilen doğruluk değerleri ile karşılaştırıldığında bu çalışmada elde edilen sonuçlarla (Tablo 3) uyum sağladığı görülmektedir.

MOS en düşük doğruluğu sağlayan sınıflandırma yöntemi olmuştur. Literatürdeki MOS yöntemini kullanan çalışmalar incelendiğinde [5, 6], bu çalışmada elde edilen sonuçlarla (Tablo 3) uyumlu olduğu görülmektedir.

Çiçekli vd. [15] tarafından yapılan çalışmada Hirfanlı Baraj Gölü çevresinde AKAÖ'yü YSA yönteminin %94, DVM yönteminin %89, ve KEYK yönteminin %88 doğruluk ile tespit etmiştir. Adam vd. [32] tarafından yapılan çalışmada Sudan'da yarı kurak alanlarda AKAÖ, nesne ve piksel tabanlı sınıflama yaparak doğruluklarını karşılaştırılmıştır. MOS, KEYK ve bulanık mantık kullanılan çalışmada, piksel tabanlı sınıflamanın 72.92%, nesne tabanlı sınıflamanın %54 doğruluk verdiği tespit edilmiştir. Çalışmalar incelendiğinde [10, 15, 30] çalışma alanına uygun olarak yöntem seçimi yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Yedigöze Baraj Gölü, Seyhan nehri ile Çatalan Baraj Gölü ve Adana Seyhan baraj gölüne bağlı olup, bölge için önemli bir su kaynağıdır. Ayrıca çevresinde orman alanları bulunmaktadır. Orman alanları, özellikle yaz mevsiminde meydana gelen orman yangınları nedeniyle düzenli olarak gözlemlenmesi ve takibi gereken alanlardır. Literatürde Yedigöze Barajı ve çevresi ile ilgili AKAÖ çalışması yer almamaktadır. Bu çalışma ile bölgede AKAÖ belirlemek ve ilerleyen zamanlarda AKAÖ değişimini tespit etmek için en uygun yöntemin KEYK olduğu tespit edilmiştir.

4 Sonuçlar

Zaman içerisinde nüfus artmakta, yaşam için en önemli kaynak olan su önem kazanmakta, su kaynaklarının yönetimi konusu gündeme gelmektedir. Bu nedenle su alanlarının gözlenmesi gereklidir. Teknolojinin gelişmesi ile birlikte sıklıkla kullanılmaya başlayan uydu teknolojileri, sulak alanların gözlemlenmesi konusunda birçok yöntem sunmuştur.

Bu çalışmada, Sentinel-2 uydu verileri kullanılarak Yedigöze Baraj Gölü ve çevresinde AKAÖ'nün belirlenmesi için hem piksel tabanlı (DVM, YSA MOS) hem de nesne tabanlı (KEYK) görüntü sınıflandırma yöntemleri kullanılmış ve doğruluk analizi yapılmıştır.

Tablo 4. MOS, YSA, DVM ve KEYK yöntemleri ile gerçekleştirilen sınıflamaların üretici ve kullanıcı doğrulukları

Sınıflar	YSA		DVM		MOS		KEYK	
	Üretici Doğruluğu (%)	Kullanıcı Doğruluğu (%)	Üretici Doğruluğu (%)	Kullanıcı Doğruluğu (%)	Üretici Doğruluğu (%)	Kullanıcı Doğruluğu (%)	Üretici Doğruluğu (%)	Kullanıcı Doğruluğu (%)
Orman Alanı	99.10	91.61	93.91	99.63	87.75	97.91	87.8	100
Yerleşim Alanı	80.79	88.61	91.33	71.08	81.57	80.31	93	83.3
Tarım Alanı	84.94	99.99	88.51	92.19	99.15	55.05	100	88.1
Su Alanı	99.56	96.75	99.71	99.11	99.99	89.74	100	100

		YSA				
		Tarım Alanı	Orman Alanı	Yerleşim Alanı	Su Alanı	Toplam
GERÇEK	Tarım Alanı	543648	11	50	0	543709
	Orman Alanı	24039	2013473	159738	575	2197825
	Yerleşim Alanı	72369	14010	672133	0	758512
	Su Alanı	0	4337	13	129408	133758
	Toplam	640056	2031831	831934	129983	3633804

		MOS				
		Tarım Alanı	Orman Alanı	Yerleşim Alanı	Su Alanı	toplam
GERÇEK	Tarım Alanı	220937	0	180425	0	401362
	Orman Alanı	0	1790129	38203	0	1828332
	Yerleşim Alanı	1890	248649	1021695	9	1272243
	Su Alanı	0	1367	12166	118334	131867
	Toplam	222827	2040145	1252489	118343	3633804

		KEYK				
		Tarım Alanı	Orman Alanı	Yerleşim Alanı	Su Alanı	toplam
GERÇEK	Tarım Alanı	37	0	0	0	37
	Orman Alanı	4	29	0	0	33
	Yerleşim Alanı	1	0	15	0	16
	Su Alanı	0	0	0	9	9
	Toplam	42	29	15	9	95

		DVM				
		Tarım Alanı	Orman Alanı	Yerleşim Alanı	Su Alanı	toplam
GERÇEK	Tarım Alanı	477163	12	40408	0	517583
	Orman Alanı	37	2256332	7894	389	2264652
	Yerleşim Alanı	61884	145226	508951	1	716062
	Su Alanı	0	1199	4	134304	135507
	Toplam	539084	2402769	557257	134694	3633804

Şekil 9. Hata matrisleri

Nesne-tabanlı sınıflandırmada, piksel tabanlı sınıflandırmadan farklı olarak segmentasyon aşamasında yansıma değerlerine göre benzer olan piksellerden oluşan segmentler elde edilmektedir ve böylece çalışma bölgesine ait sınıflar kolayca oluşturulabilmektedir. Oluşan segmentler, bir sınıf için bir bütünlük sağlar ve bu durum daha kolay bir sınıflandırma işlemini ve sınıflama doğruluğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle KEYK sonuçları diğerlerinden daha yüksek doğruluk sağlamıştır. MOS en düşük doğruluğu sağlarken, DVM ve YSA sonuçları birbirine yakın çıkmıştır.

Doğruluk sonuçları göz önüne alındığında, tüm sınıflandırma teknikleri tatmin edici sonuçlar sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, su alanları ve çevresinde AKAÖ çalışmalarında hem piksel tabanlı sınıflandırma yöntemlerinin hem de nesne tabanlı sınıflandırma yöntemlerinin kullanılabilirliğini göstermektedir. Yedigöze Baraj Gölü ve çevresi için en uygun sınıflandırma yönteminin KEYK olduğu tespit edilmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (Turnitin): % 17

Kaynaklar

- [1] M. Gholoobi, A. Tayyebi, M. Taleyi and A. H. Tayyebi, Comparing pixel based and object-based approaches in land use classification in mountainous areas. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, 38 (8), 789-794, Kyoto, Japan, 2010.
- [2] K. Kalkan ve D. Maktav, Nesne tabanlı ve piksel tabanlı sınıflandırma yöntemlerinin karşılaştırılması (IKONOS Örneği). III. UZAL-CBS, Gebze, 2010.
- [3] H. Zhang, Q. Li, L. Liu, X. Du, T. Dong, H. McNairn, C. Champagne, M. Liu and J. Shang, Object-based crop classification using multi-temporal SPOT-5 imagery and textural features with a random forest classifier. Geocarto International, 33(10), 1017-1035, 2018. <https://doi.org/10.1080/10106049.2017.1333533>.
- [4] A. M. Al Fugara, B. Pradhan and T. A. Mohamed, Improvement of land-use classification using object-oriented and fuzzy logic approach. Applied Geomatics, 1(4), 111-120, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12518-009-0011-3>.
- [5] B. R. Deilmai, B. B. Ahmad and H. Zabihi, Comparison of two classification methods (MLC and SVM) to extract land use and land cover in Johor Malaysia. In IOP conference series: Earth and environmental science, 20(1), 1-6, 2014.
- [6] M. Yaban, M. A. S. B. Azmi, M. Z. Zakaria and M. M. Isa, Comparison of support vector machines (SVMs) and maximum likelihood classification (MLC) for Nipa Palm (*Nypa fruticans*) extent in East Coast of Sabah, Malaysia. Asian Conference on Remote Sensing (ACRS 2022), 1-8, 2022.
- [7] Y. G. Yuh, W. Tracz, H. D. Matthews, and S. E. Turner, Application of machine learning approaches for land cover monitoring in northern Cameroon. Ecological informatics, 74, 1-15, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101955>
- [8] T. Kavzoğlu, İ. Çölkesen, Destek vektör makineleri ile uydu görüntülerinin sınıflandırılmasında kernel fonksiyonlarının etkilerinin incelenmesi. Harita Dergisi, 144, 73-82, 2010.
- [9] M. G. Gümüş, 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). Jeodezi Ve Jeoinformasyon Dergisi, 8(1), 57-71, 2021. <https://doi.org/10.9733/JGG.2021R0005.E>.
- [10] Ö. Akar, O. Güngör. Rastgele Orman algoritması kullanılarak çok bantlı görüntülerin sınıflandırılması. Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi, 106, 139-146, 2012. <https://doi.org/10.9733/jgg.241212.1t>
- [11] S. Doğan, E. Buğday, E. Modeling of temporal and spatial changes of land cover and land use by artificial

- neural networks: Kastamonu Sample. Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 20(3), 653-663, 2018.
- [12] ESA, European Space Agency Data Hub. <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>, Accessed 20 April 2024.
- [13] T.C. Milli Savunma Bakanlığı Harita Genel Müdürlüğü. <https://www.harita.gov.tr/urunler/>, Accessed 07 June 2024.
- [14] G. Mountrakis, J. Im and C. Ogole, Support vector machines in remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66, 247–259, 2011.
- [15] S.Y. Çiçekli, A. Şekertekin, N. Arslan, C. Dönmez, Comparison of pixel and object-based classification methods in wetlands using Sentinel-2 Data. 3rd International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2018), 298-302, 2018.
- [16] A. J. Scott and M. J. Symons, Clustering methods based on likelihood ratio criteria. Biometrics, 27 (2), 387–397, 1971.
- [17] L. Kimfung, W. Shi and H. A. Zhang, Fuzzy topology-based maximum likelihood classification. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66, 103-114, 2011.
- [18] S. Bulut ve A. Günlü, Arazi kullanım sınıfları için farklı kontrollü sınıflandırma algoritmalarının karşılaştırılması. Kastamonu University Journal of Forestry Faculty, 16 (2), 528–535, 2016. <https://doi.org/10.17475/kastorman.289762>.
- [19] M. M. Hamed, M. G. Khalafallah and E. A. Hassanien, Prediction of wastewater treatment plant performance using artificial neural networks. Environmental Modelling & Software, 19(10), 919-928, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2003.10.005>
- [20] M. S. Nasr, M. A. E. Moustafa, H. A. E. Seif and G. E. Kobrosy, Application of Artificial Neural Network (ANN) for the prediction of EL-AGAMY wastewater treatment plant performance-EGYPT. Alexandria Engineering Journal, 51(1), 37-43, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2012.07.005>
- [21] S. Haykin, Neural networks: a comprehensive foundation. Macmillan College Publishing Company, 1994.
- [22] R. E. McRoberts, M. D. Nelson and D. G. Wendt, Stratified estimation of forest area using satellite imagery, inventory data, and the k-Nearest Neighbors technique. Remote Sensing of Environment, 82(2-3), 457-468, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00064-0](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00064-0)
- [23] C. Witharana and D. L. Civco, Optimizing multi-resolution segmentation scale using empirical methods: Exploring the sensitivity of the supervised discrepancy measure Euclidean distance 2 (ED2). ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 87, 108-121, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.11.006>
- [24] A. Sabuncu, F. Sunar. Ortofotolar ile nesne tabanlı görüntü sınıflandırma uygulaması: Van-Erciş depremi örneği. Artvin Çoruh Üniversitesi Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi Doğal Afetler Ve Çevre Dergisi, 3(1), 1-8, 2017. <https://doi.org/10.21324/dacd.271091>
- [25] L. Sang, Y. Xu, R. Cao, Y. Chen, Y. Guo, R. Xu. Modelling of GaN HEMT by using an improved k-nearest neighbors algorithm. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 25(7), 949-959, 2011. <https://doi.org/10.1163/156939311795254019>
- [26] İ. Çölkese, T. Yomralıoğlu, Arazi örtüsü ve kullanımının haritalanmasında WorldView-2 uydu görüntüsü ve yardımcı verilerin kullanımı. Harita Dergisi. 80(152), 12 – 24, 2014.
- [27] T. Kavzoglu, I. Colkesen, A kernel functions analysis for support vector machines for land cover classification. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 11, 352–359, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.06.002>
- [28] M. Ayaz, Makine öğrenmesi algoritmaları ile covid-19 hastalarının belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2021.
- [29] Google LLC, 2024. Google Earth Engine (Computer software) <https://earthengine.google.com>. Accessed 06.05.2024.
- [30] H. B. Makineci, E. N. Akosman. Sentinel-2A verileriyle Trabzon İli 2019-2020 yılları arasında ortaya çıkan sınıflandırma farklarının çeşitli algoritmalarla değerlendirilmesi. Türkiye Uzaktan Algılama Dergisi, 5(2), 78–88, 2023. <https://doi.org/10.51489/tuzal.1383784>
- [31] S.Y. Çiçekli. Otomatize edilmiş nesne tabanlı arazi örtüsü sınıflandırma modeli: Aşağı Seyhan Ovası Örneği. Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2022.
- [32] H. E. Adam, E. Csaplovics, M. F. Elhaja. A comparison of pixel-based and object-based approaches for land use land cover classification in semi-arid areas, Sudan. 8th IGRSM International Conference and Exhibition on Remote Sensing&GIS, 2016.





Rölanti koşullarında çalışan benzinli bir motorun performans ve emisyonlarına asetilenin etkisi

Effect of acetylene on the performance and emissions of a gasoline engine operating under idle conditions

Mehmet İlhan İlhak^{1,*} 

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde, Türkiye

Öz

Taşıt trafiğinin yoğun olduğu saatlerde yapılan şehir içi yol testlerine göre, taşıtların bekleme süreleri toplam çalışma zamanının yaklaşık %30-38' ini oluşturmaktadır. Bu nedenle şehir içi ulaşım söz konusu olduğunda, içten yanmalı motorlar ile tahrik edilen ve taşıt sayısının büyük bir kısmını oluşturan binek otomobillerin boşta çalışırken tükettikleri yakıt miktarı ve buna bağlı olarak ortaya çıkan egzoz emisyonları önemli hale gelmektedir. Bu çalışma, yakıt olarak benzin-asetilen karışımları ve %100 asetilen kullanımının benzinli bir motorun rölanti performansı üzerindeki etkilerini araştırmaktadır. Dört zamanlı, dört silindri, su soğutmalı, buji ateşlemeli bir otomobil motoru üzerinde yapılan deneyler, tek başına benzin yerine benzin-asetilen karışımlarının ve %100 asetilen kullanılmasının, karbon monoksit ve hidrokarbon emisyonlarında azalmaya, nitrojen oksit emisyonunda ise artışa neden olduğunu gösterdi. Benzine çalışmada %2.2 olan karbonmonoksit emisyonu, benzine 100 ve 150 g/h debisinde asetilen ilavesi ile sırasıyla %1.1 ve %0.7 değerine düşerken, 895 ppm olan HC emisyonları ise 576 ppm ve 520 ppm olmuştur. Test motorunda %100 asetilen kullanılarak yapılan deneylerde, benzine çalışmaya kıyasla karbon monoksit ve hidrokarbon emisyonlarında %96 azalma, nitrojen oksit emisyonlarında ise %650 artış olduğu gözlemlendi. Motora olan enerji akışında ise %20.5 azalma olduğu tespit edildi.

Anahtar kelimeler: Asetilen, Benzin, Kıvılcım ateşlemeli motorlar, Emisyonlar, Enerji

1 Giriş

2024 yılı TÜİK verilerine göre ülkemizde trafiğe kayıtlı motorlu araçların %52.5' i otomobil sınıfı araçlardan meydana gelmekte olup, LPG dönüşümünün benzinli motorlara yapıldığı ve hibrit taşıtların büyük çoğunluğunun benzinli motor + elektrik motoru tasarımına sahip olduğu düşünüldüğünde otomobillerin %64' ü benzinli motorlar ile tahrik edilmektedir [1]. Hong Kong ve Şanghay şehirlerinde yapılan sürüş testlerinden elde edilen bulgular, trafiğin yoğun olduğu saatlerde taşıtların toplam çalışma sürelerinin yaklaşık %30-38 'inde rölantide çalıştığını göstermektedir [2,3]. Otto çevrimi ile çalışan benzinli araçlarda motorun yük durumu dizel motorlardan farklı olarak motora emilen hava miktarı ile ayarlandığı için güç ihtiyacının olmadığı rölanti

Abstract

According to city road tests conducted during peak vehicle traffic hours, vehicle idle times constitute about 30-38% of the total running time. Therefore, when it comes to urban transportation, the fuel consumption and resulting exhaust emissions from passenger cars powered by internal combustion engines and constitute a large portion of the number of vehicles, become significant while idling. This study investigates the effects of using acetylene as fuel on the idling performance of a gasoline engine. Experiments conducted on a four-stroke, four-cylinder, water-cooled, spark-ignition automobile engine showed that using gasoline-acetylene mixtures and 100% acetylene instead of gasoline alone resulted in a decrease in carbon monoxide and hydrocarbon emissions and an increase in nitrogen oxide emission. Carbon monoxide emissions, which were 2.2% in gasoline operation, decreased to 1.1% and 0.7% with the addition of acetylene to gasoline at 100 and 150 g/h flow rates, respectively, while HC emissions, which were 895 ppm, became 576 ppm and 520 ppm. In experiments using 100% acetylene in the test engine, it was observed that there was a 96% reduction in carbon monoxide and hydrocarbon emissions and a 650% increase in nitrogen oxide emissions compared to running on gasoline. It was found that there was a 20.5% decrease in the energy flow to the engine.

Keywords: Acetylene, Gasoline, Spark ignition engines, Emissions, Energy

devrinde, emme havası minimum olacak şekilde gaz keleşi kapatılmaktadır. Motora emilen havanın kısılması pompalama kayıplarını ve art gaz miktarını arttırdığından rölanti devrinde yanma kötüleşir ve bunun sonucu olarak yakıt tüketimi, karbonmonoksit (CO) ve hidrokarbon (HC) emisyonları yükselir [4]. Diğer taraftan benzinin havada hacimsel olarak dar yanma aralığı rölanti şartlarındaki performansını daha da düşürmektedir [5]. Bu durum araştırmacıları benzinli motorların rölanti performansını geliştirmek için hidrojen ve dimetil eter gibi havada hacimsel olarak geniş yanma aralığına ve yüksek alev hızına sahip yakıtlar kullanmaya yönlendirmiştir.

Wang vd. [6] benzinli bir motoru 800, 700 ve 600 d/d rölanti hızlarında benzin ile çalıştırdılar ve devir sayısı

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ilhanilhak@ohu.edu.tr (M. İ. İlhak)

Geliş / Recieved: 02.08.2024 Kabul / Accepted: 31.08.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1527226

azaldıkça döngüsel değişimin arttığını tespit ettiler. Daha sonra üç deneyi benzine hidrojen ilave ederek tekrarladılar ve yakıt karışımındaki hidrojen oranının artmasıyla döngüsel değişimde azalma olduğunu bildirdiler. Yazarlar ayrıca hidrojen ilavesinin tüm rölanti hızlarında CO, HC, NO_x (azot oksitler) emisyonlarını ve motorun enerji tüketimini azalttığını rapor ettiler. He vd. [7] sıkıştırılmış doğalgaz ile çalışan 6 silindirli buji ateşlemeli bir motoru gaz kelebeği tam kapalı konumda iken sırayla 800 d/d, 750 d/d ve 700 d/d rölanti hızlarında %55 hidrojen ile zenginleştirilmiş doğalgaz ile beslediler. Araştırmacılar hidrojen ilavesinin termal verimliliği yükselttiğini, CO ve THC (toplam hidrokarbon) emisyonlarını önemli oranda azaltırken NO_x emisyonlarında artışa neden olduğunu bildirdiler. Yazarlar hava fazlalık katsayısı sabit tutulurken rölanti devrini düşürmenin yakıt tüketimine etkisi olmadığını, 700 d/d rölanti devrinde hava fazlalık katsayısını artırmanın yakıt tüketimini düşürdüğünü tespit ettiler. Ma vd. [8] hidrojen ile çalışan buji ateşlemeli 6 silindirli, turbo şarjlı bir motorda eşdeğerlik oranı ve ateşleme avansının rölanti çalışması üzerindeki etkilerini araştırdılar. Deneylerinin sonucunda eşdeğerlik oranının artmasıyla ateşleme avansının ve termal verimliliğin azaldığını, NO_x emisyonlarının ise arttığını tespit ettiler. Araştırmacılar eşdeğerlik oranının 0.5 ve daha düşük olduğu çok fakir karışım şartlarında çok düşük miktarda NO_x emisyonu oluştuğunu ve maksimum termal verimliliğin elde edildiğini bildirdiler. Ji vd. [9] etanol ile çalışan buji ateşlemeli, 4 silindirli, 1.6 litre silindir hacimli bir otomobil motorunda dimetil eter ilavesinin stokiometrik koşullar altında rölanti performansı üzerindeki etkilerini incelediler. Yazarlar deneysel bulgulara göre dimetil eter ilavesi ile termal verimde %20' nin üzerinde artış olduğunu, alev gelişimi ve yayılımı süresinin kıaldığını, CO ve HC emisyonlarında azalma görülürken NO_x emisyonlarının arttığını bildirdiler. Chen ve Raine [10] tek silindirli benzinli bir motorda gerçekleştirdikleri deneylerde hidrojen ilavesinin farklı hava fazlalık katsayılarında rölanti performansına ve emisyonlarına olan etkilerini incelediler. Araştırmacılar tüm hava fazlalık katsayılarında hidrojen ilavesinin döngüden döngüye farklılıkları, karbonmonoksit, karbondioksit ve yanmamış hidrokarbon emisyonlarını önemli oranda azalttığını, yüksek yanma sıcaklığından dolayı NO_x emisyonlarının arttığını, bununla birlikte rölantide oluşan NO_x emisyonlarının miktarı düşük olduğundan bu artışın çok önemli olmadığını bildirdiler. Karagöz vd. [11] dört silindirli, buji ateşlemeli bir motoru benzin-hidrojen-oksijen karışımı ile rölantide çalıştırarak hidrojen ve oksijenin performans ve emisyonlar üzerindeki etkilerini incelediler. Yazarlar deneylerden elde edilen bulgulara dayanarak, karışımındaki hidrojen + oksijen oranı arttıkça motor devri ve ortalama efektif basınç değişim katsayısının, ısıl verimin, özgül yakıt tüketiminin, silindir içi pik sıcaklığın, CO ve HC emisyonlarının geliştiğini, NO_x emisyonlarının ise yükseldiğini bildirdiler. Ji vd. [12] 1.5 L hacminde doğal emişli bir benzinli motorda benzin ve dimetil eter karışımlarının stokiometrik koşullar altında rölanti performansı üzerindeki etkilerini incelediler. Yazarlar dimetil eteri ayrı bir enjektörle motora beslediler ve püskürtme zamanını arttırarak dimetil eterin toplam yakıttaki

enerji kesrini %0-100 arasında değiştirdiler. Dimetil eterin enerji kesri arttıkça motorun enerji tüketiminin, COVimep değerinin, HC ve NO_x emisyonlarının azaldığını bildirdiler. Shivaprasad vd. [13] yüksek hızlı buji ateşlemeli bir motora rölanti koşullarında benzine hidrojen ilavesinin motorun yanma ve emisyon performansı üzerindeki etkilerini incelediler. Araştırmacılar toplam yakıt içindeki hidrojenin enerji kesrini %0-25 arasında arttırdılar. Yazarlar silindir içi pik basıncın %20 hidrojen kesrine kadar arttığını daha sonra volumetrik verimin düşmesinden dolayı azaldığını, CO ve HC emisyonlarının tüm karışımlarda azalırken NO_x emisyonlarının ise arttığını bildirmişlerdir.

Benzin ile çalışan buji ateşlemeli içten yanmalı motorların rölanti performanslarını yükseltme metodlarından biri havada hacimsel olarak geniş yanma aralığına sahip yakıtları kullanmaktır. Günümüze kadar yapılan çalışmalarda araştırmacıların temiz ve yenilenebilir bir yakıt olan hidrojen üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Hidrojen ile benzer özelliklere sahip yakıtlardan biri de asetilenlerdir. Havada hacimsel olarak geniş yanma aralığı, yüksek enerji yoğunluğu, yüksek alev hızı, düşük tutuşma enerjisi ile bu alanda çalışan araştırmacıların dikkatini çeken asetilen, benzinli ve dizel motorlarda yapılan birçok çalışmada yakıt olarak kullanılmıştır [14-21]. Bununla beraber benzinli bir motorun rölanti performansını iyileştirmek kapsamında yapılan çalışmalarda asetilenin henüz kullanılmadığı görülmektedir. Bu çalışmada benzin ile çalışan bir otomobil motorunda rölanti performansını geliştirmek için yakıt olarak benzin-asetilen karışımları ve %100 asetilen kullanılmış ve benzinle çalışmaya göre bulgular üzerindeki etkileri detaylı şekilde incelenmiştir. Deneyler motorun orijinal rölanti devri olan 800 d/d' da yapılmıştır. Asetilenin kullanıldığı deneylerde hava fazlalık katsayısı ve ateşleme avansı parametreleri optimum sonuçlar elde edilecek şekilde ayarlanmıştır.

2 Materyal ve metod

Deneysel çalışmada Erciyes üniversitesi makine mühendisliği bölümü motorlar laboratuvarında bulunan Ford MVH418 test motoru kullanıldı. Motorun teknik özellikleri Tablo 1' de, deneyde kullanılan yakıtların özellikleri Tablo 2' de verilmiştir. Deneyler motorun orijinal rölanti devrinde yapıldı. Motora beslenen benzin Desis H2W hassas terazi ile kronometre tutularak ölçülürken asetilen gazının debisi Alicat M100 kütleli akış ölçer ile belirlendi. Egzoz emisyonlarının ölçümünde Bosch BEA 060 egzoz gazı analiz cihazı kullanıldı. Silindir basıncı dördüncü silindire monteli PCB 113B22 model piezoelektrik basınç sensörü ile ölçüldü. Temel ölçüm cihazlarının hassasiyetleri Tablo 3' te verilmiştir. Benzin yakıt hattına bir pompa ile üç bar sabit basınçta sevk edildi. Asetilen LPG enjektörleri ile motorun emme portları girişine beslenmektedir. Dizayn edilen elektronik bir kart LPG enjektörlerini benzin enjektörleri ile eşzamanlı çalıştırmaktadır. Dokuz kiloluk asetilen tüpünde depo edilen asetilenin basıncı regülatör ile 80 kPa basıncına düşürüldükten sonra motora beslenmektedir. Asetilen yüksek alev hızına sahip bir gaz olduğundan regülatörden sonra besleme hattı üzerine alev geri tepme ventili ve sulu güvenlik ekipmanı monte edilmiştir. Basınç sensörünün

ürettiği sinyaller amplifikatörle güçlendirilerek bilgisayara aktarılmaktadır. Deney düzeneğinin şeması Şekil 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Test motorunun özellikleri

Motor marka ve modeli	Ford MVH418
Silindir sayısı	4
Çap/Strok	80.6/88 mm
Sıkıştırma oranı	10:1
Maksimum güç	75 kW
Maksimum tork	150 Nm
Strok hacmi	1796 cm ³
Rölanti devri	800 d/d

Test motoru rejim sıcaklığına ulaştıktan sonra deneylere başlanmıştır. Her bir deney üç dakika süre tutularak motorun orijinal rölanti devri olan 800 d/d’ da yapılmış ve üç kez tekrar edilmiştir. Deneylere ilk olarak benzin ile başlandı. İkinci deneyde emme portları girişine gaz enjektörleri ile 100 g/h asetilen beslendi ve artan devir sayısı 800 d/d oluncaya kadar benzin debisi azaltıldı. Benzinli motorlarda pik silindir basıncı ÜÖN’ dan 10-20 KMA sonra oluştuğunda maksimum verim elde edilmektedir [22-24].

Tablo 2. Deneylerde kullanılan yakıtların özellikleri [14]

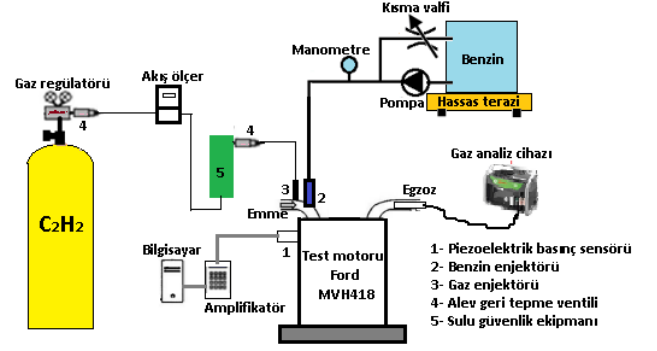
Özellikler	Asetilen	Benzin
Formül	C ₂ H ₂	C ₈ -C ₁₈
Yoğunluk (kg/m ³)	1.092	720-775
Tutuşma enerjisi (mJ)	0.019	0.24
Kendi kendine tutuşma sic. (°C)	305	246-280
Adyabatik alev sıcaklığı (K)	2500	2270
Alt ısıl değer (MJ/kg)	48.23	43
Havada yanma aralığı (% hacim)	2.5-81	1.4-7.6
Alev hızı (m/s)	1.5	0.4
Stokiyometrik hava-yakıt oranı	13.2	14.7
Oktan sayısı	50	95

Bu nedenle ateşleme avansı pik silindir basıncı bu değerler arasında kalacak şekilde ayarlandı. Üçüncü deney benzin+150 g/h asetilen karışımı ile yapıldı. Bu deneyden sonra asetilen daha fazla arttırılamadı. Çünkü benzin enjektörleri enjekte edebildiği minimum yakıt miktarına ulaşmıştı. Bu nedenle son deney %100 asetilen ile yapıldı. Tüm deneylerde yakıt tüketimleri, silindir basınç değerleri, egzoz gaz sıcaklığı ve egzoz emisyonları ölçüldü.

Tablo 3. Ölçüm cihazlarının hassasiyetleri

Cihaz adı	Ölçüm aralığı	Hassasiyet
Basınç sensörü (PCB113B22)	0-5000 psi	±%1
Hassas terazi (Desis H2W)	0-15000 g	±0.5 g
Kronometre (Kenko KK-613D)	-----	±0.01 s
Kütle akış ölçer (Alicat M100)	0.5-100 slpm	±%0.8 okuma +%0.2 T.Skala
Egzoz analiz cihazı (Bosch BEA 060)		
Karbonmonoksit (CO)	%0-10 vol.	±%0.06
Hidrokarbon (HC)	0-9999 ppm	±%0.12
Azot oksit (NO)	0-5000 ppm	±%0.5

Yakıt olarak motora sadece benzinin beslendiği deneyler makalede benzin olarak, benzine 100 g/h asetilenin ilave edildiği deneyler B+A100 olarak, benzine 150 g/h asetilenin ilave edildiği deneyler B+A150 olarak, motora sadece asetilen beslenerek yapılan deneyler ise %100A olarak kodlanmıştır.



Şekil 1. Deney düzeneğinin şeması

Her bir deney için benzin (B) ve asetilen (A) tüketimleri, yakıtların toplam enerji debileri (TED), toplam enerji debileri içindeki asetilen enerji kesirleri (AEK), hava fazlalık katsayısı (HFK) ve ateşleme avansı (AV.) değerleri Tablo 4’te verilmiştir. Tablodaki TED ve AEK değerleri sırasıyla Denklem (1) ve Denklem (2) ile hesaplanmıştır.

$$TED = (m_b \times AID_b + m_A \times AID_A) \times 0.06 \text{ (MJ/h)} \quad (1)$$

$$AEK = \frac{m_A \times AID_A}{(m_b \times AID_b + m_A \times AID_A)} \times 100 \text{ (%) } \quad (2)$$

Burada m_b ve m_A sırasıyla benzin ve asetilenin ölçülen kütleli debileri (g/d), AID_b ve AID_A sırasıyla benzin ve asetilenin alt ısıl değerleridir. TED ve AEK değerleri için ölçüm hatalarından kaynaklanan belirsizlikler Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 4. Deney parametreleri

Deney adı	B (g/h)	A (g/h)	TED (MJ/h)	AEK (%)	HFK	AV. (KMA)
Benzin	550	0	23.65	0	0.95	30
B+A100	400	100	22.02	21.90	1.00	30
B+A150	290	150	19.70	36.71	1.06	23
%100A	0	390	18.81	100	1.36	8

Tablo 5. TED ve AEK değerlerindeki belirsizlikler

Deney adı	TED belirsizlik (%)	AEK belirsizlik (%)
Benzin	1.90	0.00
B+A100	3.58	0.79
B+A150	4.10	1.50
%100A	4.10	---

Döngüsel değişkenliği karakterize etmek için kullanılan indike ortalama etkin basınç değişim katsayısı (COV_{imep}) 100 döngü analiz edilerek Denklem (3) ile hesaplanmıştır [11].

$$COV_{imep} = \left[\left(\frac{\sum_{i=1}^m (imep_i - \overline{imep})^2}{m} \right) / \overline{imep} \right] \times 100 \quad (3)$$

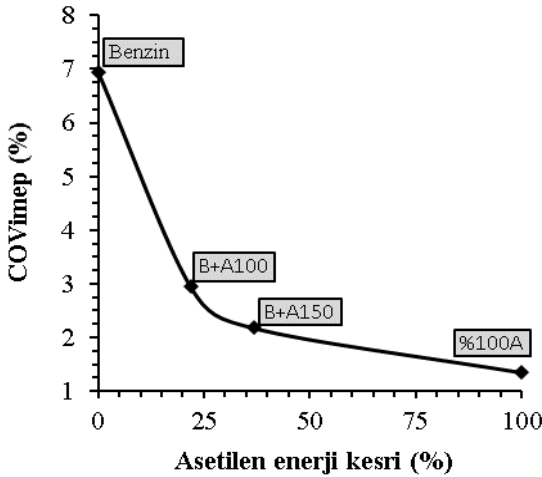
Burada $imep_i$ i. döngüdeki indike ortalama etkin basınç, $imep$ m döngünün indike ortalama etkin basınçlarının ortalaması, m ardışık çevrim sayısıdır.

3 Bulgular ve tartışma

Yapılan çalışmada yakıt olarak asetilen kullanımının 4 silindirli, su soğutmalı, elektronik enjektörlü ve ateşlemeli benzinli bir motorun rölanti çalışmasına etkisi incelenmiştir. Asetilenin rölanti performansına ve emisyonlarına etkisi benzin yakıtından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

3.1 İndike ortalama etkin basıncın dögüsel değişimi (COV_{imep})

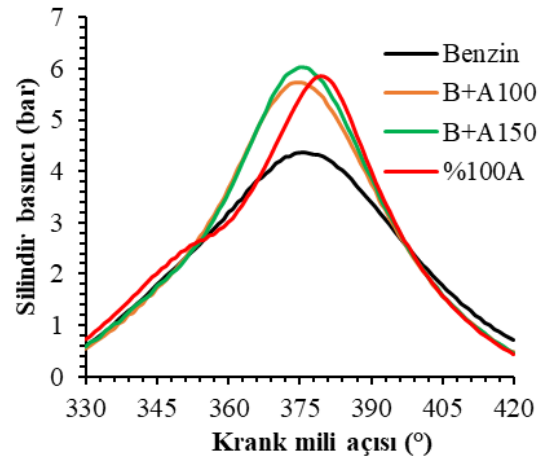
Rölanti koşullarında motorun düzgün ve kararlı bir devirde çalışması önemlidir. Aksi halde motor titreşimli çalışır, hatta aniden stop edebilir. Silindir içinde meydana gelen yanmanın oluşturduğu basınç ile çalışan içten yanmalı motorlarda, döngüden döngüye basınç değişimleri motor devrindeki kararlılığı etkiler. Döngüden döngüye basınç değişimleri yanmanın karmaşık doğasından dolayı tamamen engellenemez. Silindir içi ortalama etkin basınç değerlerinden türetilen ortalama etkin basınç değişim katsayısı dögüsel değişkenliğin önemli bir ölçüsüdür, genellikle yüzde olarak ifade edilir ve %10 değerini aşmaması istenir [20]. COV_{imep} değeri ne kadar düşük olursa motor o kadar düzenli çalışır. Şekil 2 asetilenin karışım içindeki enerji kesrine göre COV_{imep} değerinin değişimini göstermektedir. Yalnız benzin ile yapılan deneyde COV_{imep} değeri %6.95 iken asetilenin karışım içindeki enerji kesri arttıkça COV_{imep} değerinin sırayla %3 ve %2.2 olduğu görölmektedir. %100 asetilen kullanıldığında COV_{imep} değeri %1.35 olmuştur. Elde edilen sonuçlar literatürde bulunan benzer çalışmalar ile uyum içindedir [6,9,11,12]. COV_{imep} değerinin azalması asetilenin yüksek alev hızı ve enerji yoğunluğu ile yanmayı geliştirdiğini ve dögüsel basınç gelişimlerdeki değişimin azaldığını ifade etmektedir.



Şekil 2. Asetilenin enerji kesrine göre COV_{imep} değişimi

3.2 Silindir içi basınç değişimi

Silindir basıncı grafiği yanma sürecini göstermesi bakımından önemlidir. Yanmanın başladığı piston konumu, maksimum basıncın üst ölü noktadan sonra (ÜÖNS) hangi krank mili açısı (KMA)'nda olduğu, basıncın yükselme hızı vb. parametreler basınç grafiklerine dayalı analizlerle belirlenebilir. Deneylerde kullanılan yakıtlara ait basınç grafikleri Şekil 3'te verilmektedir. Benzinle yapılan deneyde pik basınç 4.36 bar iken B+A100 ve B+A150 karışımlarında sırası ile 5.74 bar ve 6.02 bar olmuştur. Her üç deneyde pik basınçlar ÜÖNS 15 KMA civarında olmuştur. Asetilen ilavesinin pik basınçları ve basınç yükselme hızını arttırdığı grafiklerden açıkça görölmektedir. Benzine hidrojen ilavesinin yapıldığı benzer bir çalışmada da silindir içi pik basıncın arttığı görölmektedir [13]. %100 asetilen ile yapılan deneyde ise pik basınçta düşme olduğu ve ÜÖNS 20 KMA'da olduğu görölmektedir. Bunun nedeni asetilenin düşük oktanlı bir yakıt olmasıdır. Düşük oktanlı yakıtlar yüksek basınç ve sıcaklıklarda, basınç darbeleri ve ısıtılabilir vurma sesiyle karakterize edilen vuruntu olayının oluşmasına neden olurlar. Vuruntudan kaçınmanın en kolay yolu ateşleme avansını azaltmak veya fakir yakıt-hava karışımı oluşturmaktır. İki yöntem birlikte de kullanılabilir. Benzinle yapılan deneyde 0.95 olan hava fazlalık katsayısı (HFK) ve 30 KMA olan ateşleme avansı, %100 asetilen ile yapılan deneyde sırasıyla 1.36 ve 8 KMA yapılmıştır. Parametrelerde yapılan bu değişikliklerin çevrim ve yanma üzerinde önemli sonuçları vardır. HFK, silindire emilen hava miktarı artırılarak yükseltildiği için manifold basıncı artmıştır. Bu nedenle sıkıştırma periyodunda basınç kırmızı renkli grafikte daha yüksek görölmektedir. Ateşleme avansının azaltılmasından dolayı yanma genişleme periyoduna kaymış ve %100 asetilen ile yapılan deneyde pik basınç 5.85 bar ölçülmüştür.

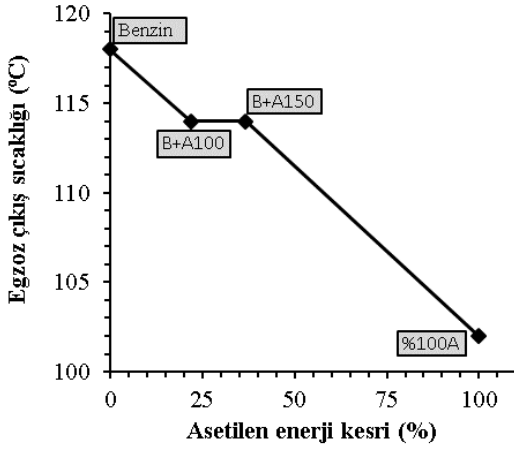


Şekil 3. Silindir basıncının KMA'ya göre değişimi

3.3 Egzoz gaz sıcaklığı

Şekil 4, deneylerde kullanılan yakıtlara ait egzoz gazı çıkış sıcaklıklarını göstermektedir. Grafiğe göre benzine asetilen ilavesi benzine hidrojenin ilave edildiği benzer bir çalışmada olduğu gibi tüm deneylerde egzoz gazı çıkış sıcaklığını düşürmüştür [6]. Benzinle çalışmada yanma olayı genişleme periyodunda da devam ettiği için egzoz gaz

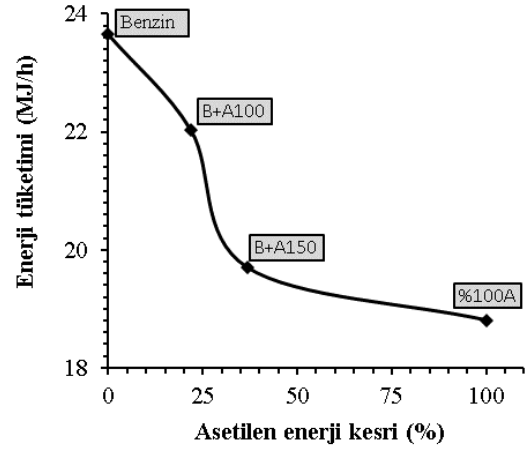
sıcaklığı 118 °C olarak ölçülmüştür. Asetilen ilavesi ile B+A100 ve B+A150 karışımlarında yanma asetilenin yüksek yanma hızından dolayı daha erken tamamlanmış ve genişlemenin etkisiyle egzoz gazları sıcaklığında benzinle çalışmaya göre bir miktar azalma olmuştur. Her iki karışımda da sıcaklık 114 °C olarak ölçülmüştür. %100 asetilen ile çalışmada vuruntudan kaçınmak için hava fazlalık katsayısının artırılması ve ateşleme avansının azaltılması egzoz gaz sıcaklığının düşmesinde etkili olmuş ve sıcaklık 102 °C olarak ölçülmüştür. Burada HFK' nın artmasıyla (HFK= 1.36) hava yakıt karışımı fakirleştiği için yanma sonu sıcaklık düşmektedir. Çünkü yanma olayında en yüksek sıcaklık değeri HFK \approx 1 olduğunda gerçekleşmektedir [24]. Yanma sonu sıcaklığının düşmesi ile birlikte geciktirilmiş ateşleme avansına rağmen asetilenin yüksek alev hızından dolayı yanmanın erken tamamlanması egzoz gaz sıcaklığını düşürmüştür.



Şekil 4. Egzoz çıkış sıcaklığının asetilen enerji kesrine göre değişimi

3.4 Enerji tüketimi

Birim zamanda motora verilen yakıt enerjisinin karışım içindeki asetilenin enerji kesrine göre değişimi Şekil 5' te verilmiştir. Şekil 5' te görüldüğü gibi asetilenin enerji kesri arttıkça motorun enerji tüketimi azalmaktadır. Benzin ile çalışmada enerji tüketimi 23.7 MJ/h iken, B+A100 ve B+A150 karışımında enerji tüketimleri sırasıyla 22 MJ/h ve 19.7 MJ/h değerlerine düşmüştür. Benzin ile çalışmada HFK' nın 0.95 olmasından dolayı yakıtın tamamının yanması için yeterli oksijenin olmaması benzinin bir kısmının yanmadan egzoz gazları ile dışarı atılmasına sebep olmakta ve yakıt tüketimi artmaktadır. Şekil 7' de HC emisyonlarının benzinle çalışma durumunda yüksek olması egzoz gazları içinde yanmamış yakıtın bulunduğunu kanıtlamaktadır. %100 asetilen ile çalışmada HFK' nın 1.36 olmasına bağlı olarak manifold basıncının yükselmesi pompalama kayıplarını azaltmakta ve fazla hava ile yakıtın tamamen yanması ısıl verimi yükseltmektedir. Motorun %100 asetilen ile rölanti çalışmasında enerji tüketimi 18.8 MJ/h olup, benzine göre enerji tüketiminde %20.6 azalma elde edilmiştir. Literatürde bulunan benzer çalışmalarda da benzine dimetiler ve hidrojen ilavesi ile enerji tüketimlerinde azalma olmuştur [6,9].

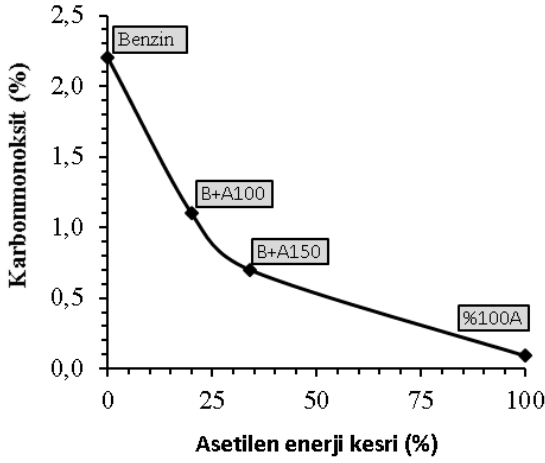


Şekil 5. Enerji tüketiminin asetilen enerji kesrine göre değişimi

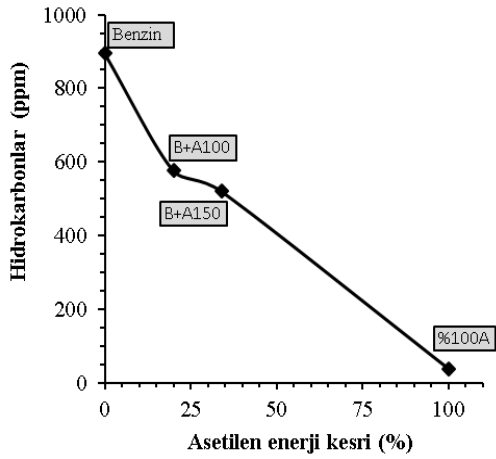
3.5 Emisyonlar

Karbonmonoksit (CO) gazı eksik yanma ürünüdür. Bu yönüyle mekanik enerjiye çevrilememiş yakıt enerjisi demektir. Diğer taraftan son derece zehirli, renksiz ve kokusuz bir gaz olup istenmeyen egzoz emisyonları arasında sayılmaktadır [4]. Karbonmonoksit emisyonunun asetilenin enerji kesrine göre değişimi Şekil 6' da verilmektedir. Benzin rölanti şartlarında zengin karışımda çalıştığı için (HFK= 0.95) eksik yanmadan dolayı %2.2 CO emisyonu üretilmiştir. B+A100 karışımında HFK= 1 olmasından dolayı yanma sonucu oluşan CO emisyonu %1.1' e düşmüştür. B+A150 karışımında HFK= 1.07 olup %0.7 CO emisyonu üretilirken, %100 asetilen ile çalışmada CO emisyonu önemli oranda azalmış ve %0.09 olarak ölçülmüştür. CO emisyonunun asetilenin enerji kesrinin artması ile azalması diğer çalışmalarla da uyum içindedir [9,11]. Gaz yakıtların sıvı yakıtlara göre hava ile daha homojen bir şekilde karışması silindir içinde zengin ve fakir karışım bölgelerinin oluşmasını azaltmaktadır. Böylece zengin karışım bölgelerinde yetersiz oksijenden, fakir karışım bölgelerinde ise konsantrasyon düşüklüğünden kaynaklanan eksik yanma olayı azalmaktadır.

Kötü kokulu ve tahriş edici olan hidrokarbon (HC) emisyonlarının bazıları kanserojendir. Hidrokarbon emisyonları yanmamış yakıt moleküllerinden ve kısmen yanmış hidrokarbon bileşiklerinden oluşur [4]. Zengin hava-yakıt karışımlarının yanması sırasında yüksek miktarda HC emisyonları üretilir. Şekil 7 HC emisyonlarının asetilenin enerji kesrine göre değişimini göstermektedir. Grafikte görüldüğü gibi HC emisyonları asetilenin enerji kesri arttıkça azalmaktadır [6,9,11]. Benzin ile çalışmada 895 ppm HC emisyonu oluşurken B+A100, B+A150 ve %100 asetilen ile çalışmada sırası ile 576 ppm, 520 ppm ve 39 ppm HC emisyonu üretildiği gözlenmiştir. Benzinin kısa çevrim süresi nedeniyle hava içinde tam olarak buharlaşmaması ve havada hacimsel olarak dar yanma aralığından dolayı zengin karışım bölgelerinde kısmi yanmanın meydana gelmesi benzin ile çalışmada HC emisyonlarını arttırmaktadır. Asetilenin gaz yakıt olması, yüksek alev hızı ve havada hacimsel olarak geniş yanma aralığı HC emisyonlarının azalmasında etkili olmaktadır.



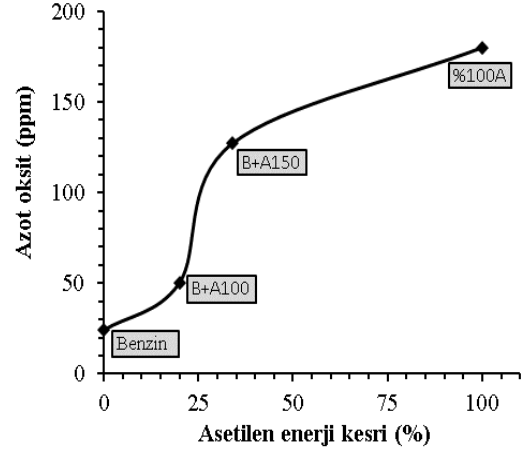
Şekil 6. CO emisyonunun asetilen enerji kesrine göre değişimi



Şekil 7. HC emisyonlarının asetilen enerji kesrine göre değişimi

Azot oksit emisyonları (NO_x) yüksek sıcaklıkta azot ve oksijen atomlarının birbiri ile reaksiyona girmesi sonucu oluşan azot oksit (NO) ve azot dioksit (NO_2) emisyonlarının genel adıdır. İçten yanmalı motorlarda oluşan NO_x emisyonlarının büyük çoğunluğu NO emisyonudur. NO_x emisyonları havada reaksiyona girerek fotokimyasal sis oluşumuna neden olduklarından dolayı oldukça zararlıdır [4]. Azot oksit emisyonunun asetilenin enerji kesrine göre değişimi Şekil 8' de tasvir edilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi asetilenin enerji kesri ile orantılı olarak azot oksit emisyonu artmaktadır [9,11]. En düşük azot oksit (24 ppm) benzinde çalışmada oluşmuştur. Bunun nedeni motorun zengin karışımda çalışması ve azotla reaksiyona girecek serbest oksijenin silindir içinde bulunmayışıdır. B+A100 karışımında HFK'nın artarak stokiometrik orana çıkmasından dolayı ortamda bulunan serbest oksijen artmış ve 50 ppm NO emisyonu oluşmuştur. B+A150 karışımı ile çalışmada asetilenin yüksek adyabatik alev sıcaklığı ve alev hızından dolayı pik basınç ve sıcaklığın artması ortamda serbest halde bulunan oksijen ile azotun reaksiyon hızını arttırmış ve NO emisyonu dik bir yükseliş ile 127 ppm olmuştur. %100 asetilen ile çalışmada ise silindir içine alınan

fazla havanın yanma sıcaklığını düşürmesi NO emisyonu artış hızını yavaşlatmış ve 180 ppm NO emisyonu oluşmuştur.



Şekil 8. NO emisyonunun asetilen enerji kesrine göre değişimi

4 Sonuçlar

Rölantide çalışan benzinli bir motorda yakıt olarak asetilen gazı kullanılmasının rölanti performansına ve emisyonlarına etkilerinin deneysel olarak incelendiği bu çalışmada elde edilen önemli bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Motorun kararlı çalışmasının bir ölçüsü olan COV_{imep} değeri benzine asetilen ilavesi ile azalmış ve benzinde çalışmada %6.95 iken %100 asetilen ile çalışmada %1.35 ile ideal değere yaklaşmıştır.
- Test motorunun enerji tüketimi benzine asetilen ilavesi arttıkça azalmış ve %100 asetilen ile çalışmada benzine göre %20.6 azalma olmuştur.
- Çevreye büyük zararları olan CO emisyonu ve HC emisyonları benzine asetilen ilavesi ile önemli oranda azalmıştır. Benzinde çalışmada %2.2 olan CO emisyonu ve 895 ppm olan HC emisyonları, %100 asetilen ile çalışmada sırasıyla %0.09 ve 39 ppm değerine düşmüştür.
- NO emisyonu benzin ile çalışmada 24 ppm iken B+A100, B+A150 karışımları ve %100 asetilen ile çalışmada artarak sırasıyla 50, 127 ve 180 ppm olmuştur. Bu yükselmenin nedeni HFK'nın artışıyla silindir içinde yanma reaksiyonuna katılmayan oksijenin artması ve azot ile reaksiyona girmesidir.

Teşekkür

Yazar deneylerin gerçekleştirildiği Erciyes Üniversitesi Makine Mühendisliği Motorlar Laboratuvarı'na teşekkürü bir borç bilir.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %4

Kaynaklar

- [1] <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Haziran-2024-53458&dil=1>

- [2] H. Y. Tong, W. T. Hung, and C. S. Cheung, Development of a driving cycle for Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 33 (15), 2323-2335, 1999. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00074-6](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00074-6)
- [3] Q. Wang, H. Huo, K. He, Z. Yao, and Q. Zhang, Characterization of vehicle driving patterns and development of driving cycles in Chinese cities. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 13 (5), 289-297, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2008.03.003>
- [4] H. Yaşar, İçten Yanmalı Motorlar Mühendislik Temelleri, İzmir Güven Kitabevi, İzmir, 2016.
- [5] C. Ji and S. Wang, Combustion and emissions performance of a hybrid hydrogen-gasoline engine at idle and lean conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 346-355, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.10.074>
- [6] S. Wang, C. Ji, M. Zang, and B. Zang, Reducing the idle speed of a spark-ignited gasoline engine with hydrogen addition. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 10580-10588, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.08.002>
- [7] Y. He, F. Ma, J. Deng, Y. Shao, and X. Jian, Reducing the idle speed of an SI CNG engine fueled by HCNG with high hydrogen ratio. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 8698-8703, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.02.062>
- [8] F. Ma, Y. He, J. Deng, L. Jiang, N. Naeve, M. Wang, and R. Chen, Idle characteristics of a hydrogen fueled SI engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 4454-4460, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.12.121>
- [9] C. Ji, C. Liang, Y. Zhu, X. Liu, and B. Gao, Investigation on idle performance of a spark-ignited ethanol engine with dimethyl ether addition. *Fuel Processing Technology*, 94, 94-100, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.10.006>
- [10] Y. Chen and R. Raine, The effects of hydrogen supplementation on idle performance and emissions of an SI engine. *Fuel*, 176, 190-199, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.02.055>
- [11] Y. Karagöz, T. Sandalcı, and A. S. Dalkılıç, Effects of hydrogen and oxygen enrichment on performance and emissions of an SI engine under idle operating condition. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 8607-8619, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.05.006>
- [12] C. Ji, L. Shi, S. Wang, X. Cong, T. Su, and M. Yu, Investigation on performance of a spark-ignition engine fueled with dimethyl ether and gasoline mixture under idle and stoichiometric conditions. *Energy*, 126, 334-342, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.045>
- [13] K. V. Shivaprasad, P. R. Chitragar, and G. N. Kumar, Effect of hydrogen addition on combustion and emissions performance of a high speed spark ignited engine at idle condition. *Therma Science*, 22, (3), 1405-1413, 2018. <https://doi.org/10.2298/TSCI180407157S>
- [14] M. İ. İlhak, S. Tangöz, S. O. Akansu, and N. Kahraman, An experimental investigation of the use of gasoline-acetylene mixtures at different excess air ratios in an SI engine. *Energy* 175, 434-444, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.058>
- [15] G. Çınar, A. Eldamanhory, S. O. Akansu, H. E. Fil, and M. İ. İlhak, Experimental study on an SI engine fuelled by lpg/acetylene mixtures. *International Journal of Automotive Technology*, 21 (5), 1323-1331, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12239-020-0125-5>
- [16] S. Tangöz, M. İ. İlhak, S. O. Akansu, and N. Kahraman, Experimental investigation of performance and emissions of an SI engine fueled by acetylene-methane and acetylene-hydrogen blends. *Fresenius Environmental Bulletin*, 27 (6), 4174-4185, 2018.
- [17] E. Vural ve S. Özer, Buji ateslemeli motorlarda yakıtta asetilen gazı ilavesinin egzoz emisyonlarına etkisinin deneysel analizi. *BEÜ Fen Bilimleri*, 3 (1), 24-34, 2014.
- [18] M. İ. İlhak, R. Doğan, S. O. Akansu, and N. Kahraman, Experimental study on an SI engine fueled by gasoline, ethanol and acetylene at partial loads. *Fuel*, 261, 116148, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116148>
- [19] H. E. Fil, S. O. Akansu, and M. İ. İlhak, Experimental assessment on performance, emission and combustion characteristics of the use of diesel-acetylene mixtures at different loads in a ci engine. *Fuel*, 324, 124469, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124469>
- [20] M. İ. İlhak, Effects of using acetylene-enriched biogas on performance and exhaust emissions of a dual fuel stationary diesel engine. *Process Safety and Environmental Protection*, 188, 1318-1325, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.06.018>
- [21] T. Lakshmanan and G. Nagarajan, Experimental investigation of timed manifold injection of acetylene in direct injection diesel engine in dual fuel mode. *Energy*, 35 (8), 3172-3178, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.03.055>
- [22] J. B. Heywood, *Internal combustion engine fundamentals*. Singapore: McGraw Hill Book Company; 1998.
- [23] R. Stone, *Introduction to internal combustion engines (Second edition)*. The Macmillan Press LTD. Houndmills, Basingstoke, Hampshire RG21 2XS and London, 1992.
- [24] C.R. Ferguson and A.T. Kirkpatrick. *Internal combustion engines applied thermosciences (3th edition)*. John Wiley & Sons Ltd, United Kingdom, 2016.





Uçan nesnelerin THz haberleşmesi Flying things in THz communication

İsmail Ersin^{1,*}, Mustafa Akkaş², Orhan Dağdeviren³

¹ Ege Üniversitesi, Uluslararası Bilgisayar Enstitüsü, 35100, İzmir Türkiye

² Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği 14030 Bolu Türkiye

³ Ege Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği, 35100, İzmir Türkiye

Öz

Çalışmamızda THz kanalı uygulamaları ve THz bandı özellikleri incelenmiştir. THz bandında havadan yere, havadan havaya iletişimde kapasiteyi etkileyen, anten gücü, mesafe, ortama bağlı emilim kaybı gibi faktörler incelenmiştir. Her maddenin moleküler yapısı farklı olduğu için madde molekül yapısına bağlı olarak belli frekanstaki elektromanyetik dalgayı (EM) rahat geçirirken bazılarının geçişine izin vermez. Maddeye özgü olarak emilimin az olduğu frekans aralığına iletim penceresi adı verilir. Çalışmamızda pratik sonuçlar veren SSRAM (Satır Satır Radyatif Aktarım Modeli)'den ortama ve frekansa bağlı emilim katsayıları elde edilmiştir. Bu katsayılar kullanılarak iletim pencereleri gösterilmiştir. Madde yoğunluğunun değiştiği atmosfer katmanlarında iletim pencerelerinin de buna bağlı olarak değiştiği ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Gürültünün dar bant genişliğinde düşük olduğu ve bunun sinyal gürültü oranını (SGO) yükselttiği gösterilmiştir. THz dalgalarının emilim duyarlı olduğu gösterilmiş buna bağlı hesaplamalarla bu durum vurgulanmıştır. İçerisinde farklı oranda madde bulunan altı farklı hava modelinden elde edilen kapasiteler, kapasitenin iklimsel etkisini göstermesi açısından değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: THz bantları, THz emilim katsayısı, Sinyal Gürültü Oranı

1 Giriş

5G 2020 yılında standartlaştırıldı. 5G, iletişimde mobil geniş bandın yanı sıra ultra güvenilir düşük gecikmeli iletişim sunmayı hedeflemektedir. Maksimum tepe hızı 20 Gbps ve kullanıcı deneyim hızı 0.1 Gbps'dir. Ayrıca, 500 km hareketliliği destekleyen 1 ms uçtan uca gecikme süresiyle 1 milyon cihaz/km² kadar ulaşmayı amaçlar [1]. Bugün gelinen noktada hedeflerin gerçekleşmesi için en erken sürenin 2030'dan sonrası olduğu tahmin edilmektedir. 5G iletişimde hala %100 kapsama alanına erişememiştir, bu sürücüsüz araçların iletişimi gibi yoğun bilgi akışı olan ağlarda yönetilebilirlik açısından büyük zorluktur [2]. 5G'nin bu kısıtları araştırmacıları 6G üzerine çalışmaya motive etmiştir. 5G'nin sağladığı servislerin yanı sıra %100 coğrafi kapsama alanı, cm hassaslığında coğrafi konum tespiti 6G'den beklenmektedir [3]. 6G'nin %100 kapsama

Abstract

Our study examines THz channel applications and THz band characteristics. Factors affecting capacity in air-to-ground and air-to-air communication in the THz band, such as antenna power, distance, and environment-dependent absorption loss, have been analyzed. Since the molecular structure of each material varies, some electromagnetic waves pass easily through certain substances at specific frequencies, while others are blocked. The frequency range with minimal absorption for a material is called the transmission window. In our study, absorption coefficients, dependent on the environment and frequency, were obtained using SSRAM (Step-by-Step Radiative Transfer Model). These coefficients illustrate transmission windows. Variations in transmission windows across atmospheric layers with changing material density are explained. It is shown that noise is low in narrow bandwidths, improving the signal-to-noise ratio (SNR). THz waves are sensitive to absorption, and this is emphasized through calculations. Capacities from six weather models, each containing varying material quantities, are evaluated to demonstrate the climatic effect on capacity.

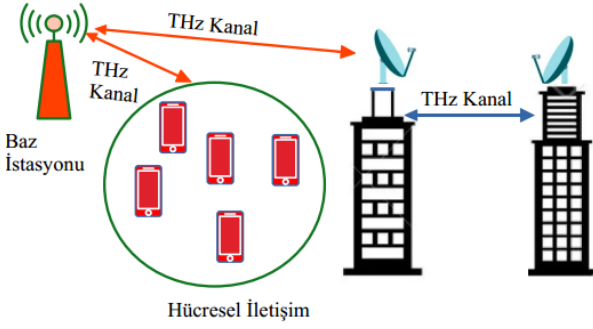
Keywords: THz bands, THz absorption coefficients, Signal-to-Noise Ratio (SNR)

alanına ulaşma ideali ancak zorlu ortamlarda insansız hava araçlarıyla THz veya optik bant kullanılarak gerçekleştirilebilir [4]. Işık tayfından yer alan THz bandı, görünür ışık ile radyo dalgaları arasında yer almasına ve bu dalgalarla benzer özellikler göstermesine rağmen kötü hava şartlarında bile ışık dalgalarına göre daha az sinyal zayıflamasına uğramaktadır. THz bandı, örneğin Şekil 1'de görüldüğü gibi iki ana iletişim omurgasını birbirine bağlayan sistemlerde, Şekil 2'de görüldüğü gibi araç ağlarında, büyük veri merkezlerinde yakın mesafelerde iletişimde, artırılmış gerçeklik [5], e-sağlık [6], dijital eş [7] gibi zaman hassasiyetli uygulamalarda veri aktarım süresini azaltarak çok geniş uygulama alanlarına sahip olacaktır [8].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ismail.ersin@yahoo.com (İ. Ersin)

Geliş / Received: 23.02.2024 Kabul / Accepted: 04.09.2024 Yayımlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1441329



Şekil 1. Ana iletişim omurgasını birbirine bağlayan sistemlerde THz bandı kullanımı



Şekil 2. Sürücüsüz araç ağları

Hücresel yeniliklerde bile LTE-A yalnızca 1 Gbps veri gönderme hızına ulaşabilmiştir [9]. Bu gibi hücresel bağlantılar THz bandı aracılığıyla oluşturulabilir ve bu linkler depremler, tsunami, sel gibi doğal felaketler nedeniyle kesintiye uğramış ağ alt yapısını Şekil 3'te görüldüğü gibi yeniden kurmak için kullanılabilir [10].



Şekil 3. Deprem sel tsunami gibi felaketler nedeniyle bozulmuş iletişim alt yapısının onarılması

Elektromanyetik iletişimde bant genişliği, dalganın frekansına ve enerjisine bağlıdır. THz bandında iletişim, 0.75-10 THz frekans aralığında gerçekleştirilir. Terahertz dalgaları dalga boyu nedeniyle madde moleküllerinde titreşime neden olmaktadır. Molekül yapısı farklı her malzeme için bu özellik parmak izi gibidir. THz dalgalarının maddenin titreşimsiz bölgelerinde geçirgenliği yüksektir, bu yüzden THz dalgaları yayıldıkları maddenin titreşimsiz

aralığına uygun frekansta yayılması gerekir [11]. Her maddeye özgü geçirgenliğin yüksek olduğu frekans aralığına iletim penceresi denir. Bu çalışmada atmosfer katmanlarında irtifaya bağlı olarak farklı iletim pencerelerinin olduğu bu iletim pencerelerinin yükseklik ve farklı hava modelleri ile nasıl değiştiği analiz edilmiştir. Elektromanyetik dalga boşlukta yol alırken moleküllerden etkilenmez ve sadece yayılım gecikmesi yaşanır. Boşlukta yol alan dalganın enerjisinin ne kadarının alıcıya ulaştırıldığı standart Friis denklemi [12] ile hesaplanır. THz dalgaları ortamda ilerlerken su ve çeşitli moleküller tarafından enerjisinin soğurulması sonucu yüksek oranda emilim kaybına uğramaktadır. Bu nedenle su ve gaz yoğunluğunun çok yüksek olduğu deniz seviyesine yakın yerlerde iletim mesafesi kısalmaktadır. Bunu yapmış olduğumuz iletişim kanalı benzetiminde elde ettiğimiz sonuçlardan da gözlemledik. Yol arttıkça molekül etkileşimi süreceğinden emilim kaybı da artar. Emilim kaybının ne kadar olacağı hesaplanırken emilim katsayısı kullanılır. Emilim katsayısı, bir maddenin içerisinde geçen elektromanyetik dalganın gücünün azalmasını bir ölçüsüdür. Her maddeye özgü olarak hesaplanır. Hesaplama yapılırken THz dalgasının geçtiği ortamın içinde bulundurduğu maddesel oranlara göre ışığın iletimini ve emilimini hesaplayan spektroskopik parametrelerin veri tabanı kullanılır, hava araçları gaz ortamında çalıştığı için bu çalışmada pratikle aynı sonuçları veren SSRAM [13] kullanılmıştır. Geçmişte THz bandının daha çok elektronik devrelerde devre elemanları veya veri merkezlerinde sunucular arasında iletişim sağlamak için kullanılabileceği düşünüldü. Geline nokta yapılan çalışmalarda bu düşüncenin genel olamayacağı ortamsal olarak bir ayırım yapılabileceği görülmüştür [11]. THz bandının yeryüzünden uzaya kadar olan büyük bir ölçekte kullanım olanakları olacaktır [14]. Bu çalışmada THz bandında ortam farklılıklarına göre elde edilen kapasite ve kapasiteyi etkileyen hava araçları arası mesafe, irtifa, anten gücü gibi etkenler MATLAB'da oluşturulan fiziksel kanal modeli kullanılarak incelenmiştir. Çalışmanın katkısı;

- SSRAM kullanılarak gerçekte aynı emilim katsayıları elde edilmiştir.
- Emilim katsayıları kullanılarak farklı yüksekliklerde farklı iletim pencerelerinin olduğu gösterilmiştir.
- Her iletişim penceresi için bant genişliği hesaplanmıştır. Belirlenen bantlar için SGO bulunmuştur.
- Hava ortamında elde edilen gerçekçi parametrelere göre, yüksekliklere çıkıldıkça emilimin etkisi gösterilmiştir.
- THz bandının ortamdaki en fazla etkilendiği su buharının farklı seviyelerde olduğu altı farklı hava modeli açısından elde edilen kapasiteler gösterilmiştir.

Çalışmamızın ikinci bölümünde fiziksel katman hesaplamaları, THz bandı iletim kısıtları gösterilmiştir, üçüncü bölümde MATLAB'da oluşturulan benzetim ortamında eşik emilim değerine göre oluşan iletim pencerelerinin irtifaya bağlı olarak nasıl değiştiği analiz

edilmiştir. Kapasiteyi etkileyen eşik emilim değeri ile belirlenen bant genişliği, mesafe ve irtifa konuları tartışılmıştır. Dördüncü bölümde ise çalışmamızda elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

2 Materyal ve metot

2.1. Fiziksel Kanal hesaplamaları

Alınan sinyal gücü **Denklem (1)**'de gösterilmiştir. **Denklem (1)**'de P_t verici anten iletim gücü, G_r ve G_t sırasıyla alıcı ve verici antenin kazançlarını belirtir. L_0 boş alan yol kaybıdır ve değeri **Denklem (2)**'de hesaplanmıştır.

$$P_r (dBm) = P_t (dBm) + G_r (dB) + G_t (dB) - L_0 (dB) \quad (1)$$

$$L_0 = 32.4 + 20 \log_{10} (d) + 20 \log_{10} (f) \quad (2)$$

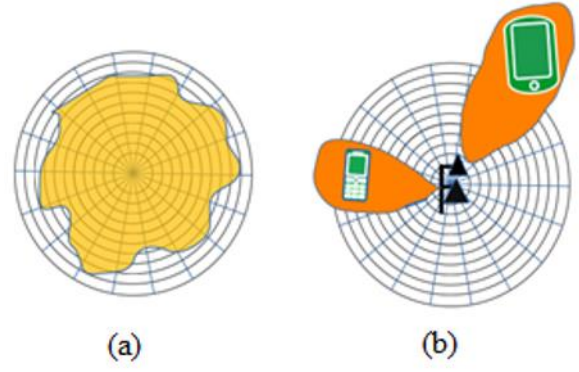
Denklem (2)'de d 'nin birimi km ve f frekans ve birimi ise MHz'dir. Friis denkleminde yol kaybına ek olarak gürültü kaybı ve ortam kaybı da eklendiğinde **Denklem (3)** elde edilir.

$$P_r (dBm) = P_t (dBm) + G_r (dB) + G_t (dB) - L_0 (dB) - L_{Gürültü} (dBm) - L_{Ortam} (dB) \quad (3)$$

$$L_{Ortam}(f, d) = k(f)_{gaz} * d * 10 * \log_{10} e (dB) \quad (4)$$

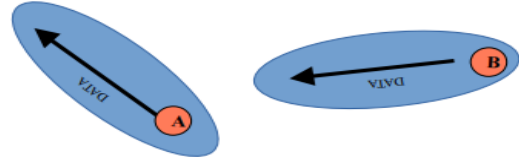
THz dalgaları enerjilerinin bir kısmı ile havadaki molekülleri titreştirir, bu olay sonucunda kaybedilen enerjiye emilim kaybı denir. Emilim kaybı SSRAM veri tabanında bulunan maddeye özgü katsayılarla **Denklem (4)** kullanılarak dB cinsinden hesaplanır.

Wi-Fi iletişimde elektromanyetik dalganın küresel bir yüzeyde yayıldığı **Şekil 4-a**'daki gibi her yöne iletim yapan anten kullanılmaktadır. **Şekil 4-b**'de gösterildiği gibi THz bandında kullanılan anten yönlüdür ve hüzme şeklinde iletişim yapılır. Antenlerin yönlü olması, anten hüzmesinin birbirine bakma zorunluluğu, iletişim kurmadan önce kanalın hazırlanması THz bandının kısıtlarındandır [15]. Hava araçlarında THz bandında iletişim kurması için kullanılan yönlü antenlerin birbirini iletişim süresince görmesi gerekmektedir. Bu yönün ve hızın hava koşullarına bağlı olduğu hava araçlarla oluşturulan ağlarda araçların komşularından sadece birini görüp diğerlerinden haberdar olmamasına sebep olmaktadır. Bu durum literatürde yönlü antenlerle iletişimde yaşanan sağırılık problemi (**Şekil 5**) olarak isimlendirilir [16]. Sağırılık problemi şu şekilde oluşur; **Şekil 5**'te gösterildiği gibi B düğümü A düğümüyle haberleşmek istiyor fakat A'nın anten hüzmesi başka bir yöne bakıyorsa; A, B için sağır ve iletişim gerçekleşmez. Hareketliliğin olduğu ve durumun hava şartlarına göre değiştiği, hava araçlarının birbirleriyle iletişimi için uyarlamalı (adaptif) yöntemler önerilmiştir. Bu yöntemde uçtan uca zaman gecikmesini azaltan, daha az mesaj çarpışması olan, verimi yüksek bir kanal için her yöne iletim sağlayan yönlü antenler kullanılmıştır [15].

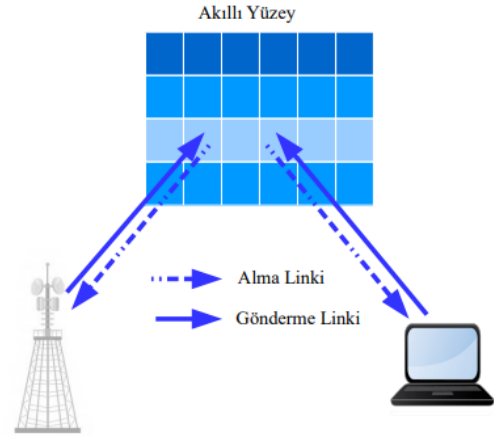


Şekil 4. Anten tipleri şekil (a) her yöne ileten anten (b) yönlü anten

Aynı şekilde [17] her yöne yönlü antenler kullanılmış gönderilecek olan pencere (frame) ve pencere alanları bunların kanalın verimine olan etkisini gösteren matematiksel çıkarımlar yapılmıştır. İlgili çalışmada iki aşamada iletişim yapılmaktadır. Aşama 1'de her yöne iletim yapan anten uyarılmakta Aşama 2'de iletişim yönlü antenle THz bandında yapılmaktadır.



Şekil 5. Anten tipleri



Şekil 6. Akıllı yüzeyler

Anten yönünün tayin edilmesi için ana kısımları **Şekil 6**'da gösterilen akıllı yüzeylerin kullanıldığı çözümler de bulunmaktadır, çalışmada [18] yönlü antenlerin birbirini görmesini sağlayacak akıllı yüzeyi kullanarak derin öğrenmeye dayalı hüzme tespiti yapılmıştır. Yönlü antenlerde iletişimde hüzme tespiti ve algoritmaları hala güncelliğini korumaktadır [19]. THz tarafında geliştirilecek

etkin algoritmalar bandın kullanımını daha da yaygınlaştıracaktır.

3. Bulgular

3.1. Emilim kaybı ve emilim katsayıları

Madde belli bir ortamdaki geçerken sahip olduğu enerjinin bir kısmını ortamdaki moleküllerin iç enerjisine dönüştürerek kaybeder. Bu kayıp EM dalganın frekansına, ortamdaki madde moleküllerinin oranına ve çeşidine bağlı olarak değişir. Bu değişim Beer Lambert yasası [20] ile açıklanır. Beer-Lambert yasası, bir maddenin içinden geçen ışığın şiddetinin, maddeye olan geçiş mesafesi ve madde içindeki moleküllerin emilim özelliği arasında logaritmik bir ilişki olduğunu belirtir. Yani, ışığın bir maddenin içinden geçerken azalma miktarı, madde içinde seyahat ettiği mesafe ve maddenin emilim katsayısı ile doğru orantılıdır. Emilim kaybı Denklem (5)'deki gibi hesaplanır. Burada I_0 ortama giren elektromanyetik dalganın başlangıçtaki şiddeti, I ortamdaki ayrılan EM dalganın şiddeti olmak üzere, $k(f)$ ortamdaki her bir madde için hesaplanan ortama özgü emilim katsayısı, d EM dalganın maddenin içinden geçtiği yolun uzunluğudur. Ortamda bulunan moleküllerin cinsine ve oranına bağlı olarak genel bir $k(f)$ değeri ise Denklem (6)'daki gibi hesaplanır.

$$I = I_0 \times e^{-k(f) \cdot d} \quad (5)$$

$$k(f) = \sum_i k_i(f) \quad (6)$$

Madde moleküllerinin atomsal ve oransal dağılımına bağlı olarak oluşturulan atmosfer modellerinden elde edilen katsayılarla hangi frekansta EM dalganın gücünden ne kadar emilim olacağı hesaplanır. Madde molekülleri açısından her molekülün az ya da çok bir emilim etkisi olduğu bu modellerden elde edilen bilgiler ışığında değerlendirildiğinde THz bandı için su buharının ölümcül bir etkisi olduğu gösterilmiştir [21]. Bu kayıp atmosfer katmanlarındaki su buharı miktarı, sıcaklık ve basınca bağlı olarak değişkenlik gösterir. Belli bir yükseklikteki su buharı yoğunluğu Denklem (7)'de gösterildiği gibi hesaplanır h_0 ölçek yüksekliği denir ve su buharının hangi aralıklarda değiştiğini ifade eder ölçek yüksekliği standart olarak 2 km olarak alınır. ρ_0 değeri standart zemin seviyesi su buharı yoğunluğunu göstermek üzere, $p(h)$ h yüksekliğindeki su buharı miktarını g/m^3 cinsinden vermektedir. Denklem (8)'de su buharı yoğunluğuna bağlı olarak belli bir yükseklikte hesaplanan basıncı ifade etmektedir.

$$\rho(h) = \rho_0 \exp(-h / h_0) \text{ g/m}^3 \quad (7)$$

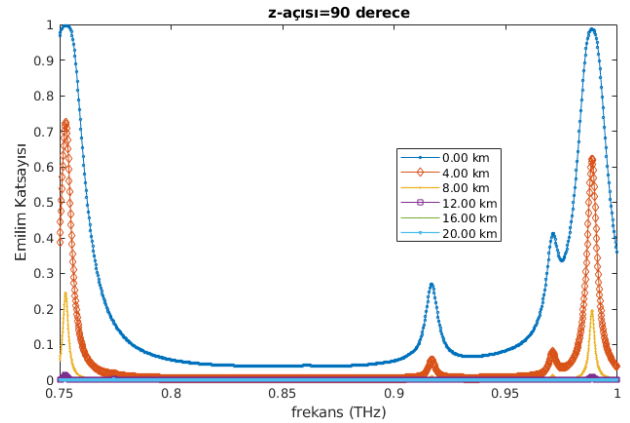
$$e(h) = \rho(h) * T(h) / 216.7 \text{ hPa} \quad (8)$$

Denklem (7) ve (8)'den yararlanarak yükseklikle birlikte su buharı yoğunluğunun azaldığı sonucunu çıkarabiliriz. Fakat bu yoğunluk belli bir yüksekliğe kadar azalmakta belli bir yükseklikten sonra değişmemektedir [15]. Denklem (9)'da belirli bir yüksekliğe ulaşıldığında, $e(h)/P(h) = 2 \times 10^{-6}$ olacak şekilde su buharı oranının bir dengede kaldığı ifade ediliyor. Bu değer, belirli bir yükseklikteki su buharının

basınç içindeki oranını ifade ediyor. Belirli bir noktada bu oranın sabitlendiği ve yükseklerde bu oranın değişmediği görülmektedir.

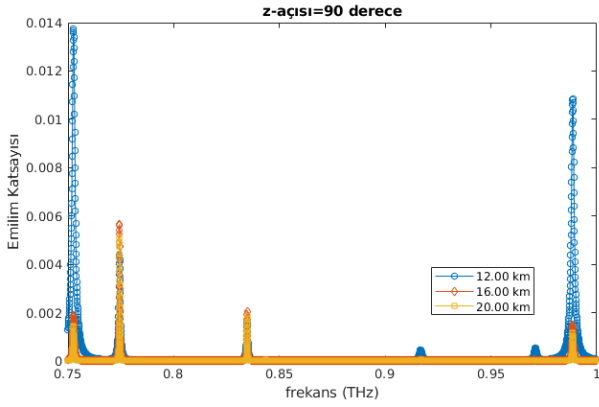
$$e(h)/P(h) = 2 \times 10^{-6} \quad (9)$$

Şekil 7'de 0, 4, 8, 12, 16, 20. km irtifalarda ayrı ayrı hesaplanmış frekansa bağlı emilim katsayıları ($k(f)_{\text{gaz}}$) gösterilmiştir. Yükseklik arttıkça emilim katsayısı değerlerinin azaldığını görmekteyiz. Madde bazı frekanslarda titreşirken bazı frekanslarda da titreşmez. Şekil 7'de görüldüğü gibi deniz seviyesinde hava içinde bulunan madde moleküllerin bulunduğu orana bağlı olarak bazı frekanslarda emilim daha çok gerçekleşir bazılarında ise emilim çok az gerçekleşir. Emilimin daha az gerçekleştiği bu frekans aralığına iletim penceresi denir [22]. İletim penceresi yükseklerle çıkıldıkça titreşen madde miktarının azalması nedeniyle genişler. Şekil 7 takip edildiğinde 0. km yükseklikte deniz seviyesinde emilim katsayısının 4. ve 8. km'lerdeki emilim katsayısından daha yüksek hesaplanması, su buharı yoğunluğunun deniz seviyesinde en yüksek düzeyde olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 7. 0, 4, 8, 12, 16, 20 km irtifada frekansa bağlı emilim katsayıları

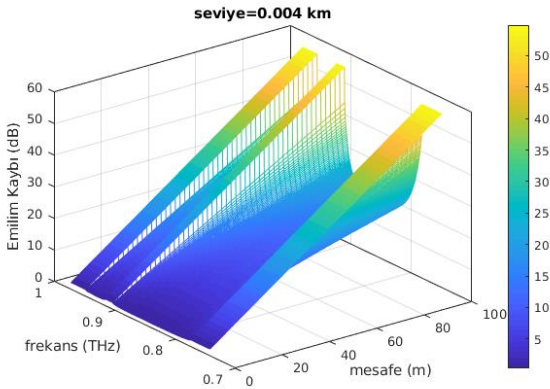
Yükseklere çıkıldıkça su buharının etkisinin azalması sonucu 0, 4 ve 8. km'lerde emilim katsayıları belirgin farklılıklar gösterirken 8 km'den sonra su buharının sabitlenmesi sonucu farklılıklar azalmış emilim katsayıları 0'a yaklaşmıştır. Daha çok ayrıntı göstermesi açısından Şekil 8'de 12 ile 20 km arası irtifalarda hesaplanan emilim katsayıları gösterilmiştir. Şekil 8 analiz edildiğinde emilim katsayılarının 0.014 mertebesinde ihmal edilebilir bir değerde olduğu görülmektedir. Şekil 7'ye bakıldığında deniz seviyesinde iletim penceresinin 0.85-0.89 THz aralığında olduğu, Şekil 8'de ise 8 km den sonra iletim penceresinin 0.75-0.98 THz aralığına genişlediğini gösterilmiştir. Şekil 7 ve 8 birlikte analiz edildiğinde yükseklikle birlikte emilimin etkisi azalır.



Şekil 8. 12, 16, 20 km irtifalarda emilim katsayıları

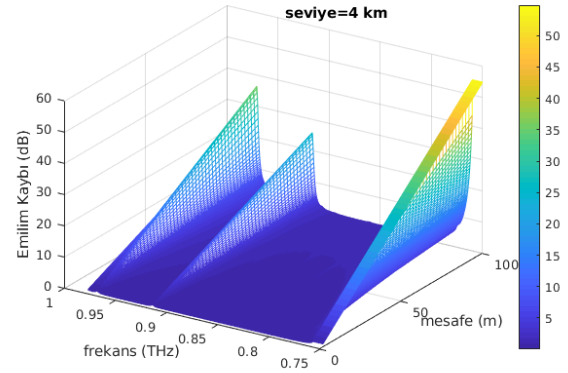
3.1.1 Emilim kaybı hesaplanması

Denklem (4) ve SSRAM'den elde edilen katsayılar kullanılarak deniz seviyesinden başlayarak 0, 4 ve 8. kilometre irtifadaki hava araçları arasındaki mesafenin 0 ile 100 metre aralığında ölçülen değerlerinde emilim kayıpları, dB cinsinden Şekil 9 ve 10'da gösterilmiştir. Şekil 9'da, hava araçları 4 metre irtifada iken ölçülen emilim kaybı değerleri dB cinsinden sunulmuştur. Hava araçları deniz seviyesinden 4 metre yükseklikteyken aralarındaki mesafe 100 metre olduğunda ölçülen emilim kaybı ortalama 30 dB civarındadır. Şekil 10'da ise hava araçlarının 4 km irtifada olduğu durumda elde edilen emilim kayıpları gösterilmektedir.

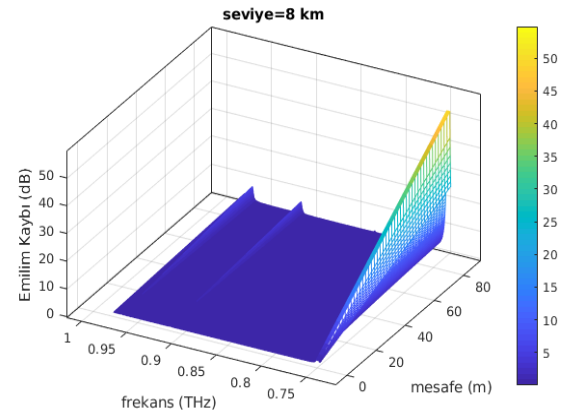


Şekil 9. 4 m de farklı mesafeler için hesaplanan emilim kaybı

Grafiğe baktığımızda araçlar arası mesafenin 100 m olduğu durumda emilim kaybının ortalama 15 dB olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, Şekil 11'de hava araçlarının 8 kilometre irtifada olduğu durumda mesafeye bağlı hesaplanan emilim kaybı değerleri sunulmuştur. Burada emilim kaybının ortalama olarak hava araçları arası mesafenin 100 m olduğu durumda 5 dB civarında olduğu görülmektedir.



Şekil 10. 4 km irtifada farklı mesafeler için hesaplanan emilim kaybı



Şekil 11. 8 km irtifada farklı mesafeler için hesaplanan emilim kaybı

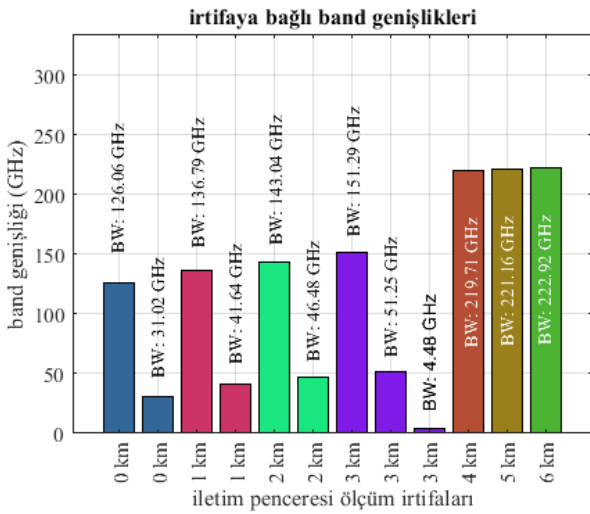
3.1.2 Emilim kaybı mesafe ilişkisi

Emilim kaybının hesaplanmasında kullanılan Denklem (4) incelendiğinde mesafe etkisinin doğrusal olduğu görülür. Hava araçları arasındaki mesafe arttıkça elektromanyetik dalganın madde molekülleri ile etkileşim süresi artacak bu da emilim kaybını artıracaktır. Bu sebeple irtifanın 4 m olduğu durumda elde edilen değerlerin bulunduğu Şekil 9'a bakıldığında 0.78-0.89 THz iletim penceresinde 1 m'den 100 m'ye kadar olan hava aracı mesafesinde emilim kaybının 1 dB'den 25 dB'ye kadar değiştiği görülmektedir. İrtifanın 4 km olduğu durumda aynı iletim penceresi için aynı mesafe aralığında emilim kaybı 1 ile 15 dB arasında hesaplanmıştır. Öte yandan irtifanın 8 km olduğu durumda ise hesaplanan emilim kaybının 1 ile 5 dB aralığında olduğu görülmektedir. Mesafe arttıkça Şekil 9, 10, 11'de emilim kaybının katsayı ölçüsünde arttığını gözlemlemekteyiz. İrtifa ile birlikte emilim katsayılarında bir azalma görülmüştür. Emilim katsayısındaki azalmadan dolayı da aynı mesafede irtifa arttıkça emilim kayıpları azalmıştır.

3.2. Bant Genişliği

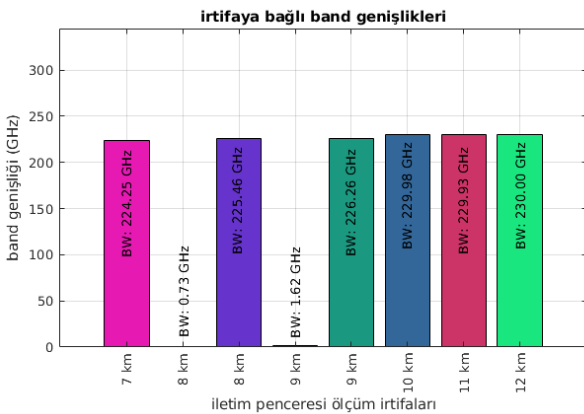
Taşıyıcı frekans ve bant genişliği arasındaki ilişki, iletişim sistemlerindeki veri iletimi ve kapasiteyi belirleyen önemli bir faktördür. Taşıyıcı frekans, belirli bir frekans

temsil ederken, bant genişliği bu taşıyıcı frekansın üzerinde ve altında iletilen verinin genişliğini ifade eder. Bu ilişki, iletişim sistemlerinin tasarımı ve performansı üzerinde büyük etkiye sahiptir. Çalışmamızda 0.75-0.98 THz frekans aralığında deniz seviyesinden 6 km irtifaya kadar elde edilen emilim katsayısının 0.10 eşik değeri seçilmesi ile bulunan iletim pencereleri ve bu pencerelerin bant genişliği hesaplanmıştır. İrtifa arttıkça atmosferde madde oranlarının değiştiği ve bu moleküllerin farklı frekans emilim hassasiyetlerine göre farklı iletim pencereleri oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan bu iletim pencereleri seçilerek elde edilen bantlar bulunmuştur.



Şekil 12. İrtifaya bağlı bant genişlikleri 0-6 km

Oluşan iletim pencerelerinin 0-7 km arasında dar olduğu, 7 km den sonra ise genişlediği Şekil 12 ve 13 incelendiğinde görülecektir.



Şekil 13. İrtifaya bağlı bant genişlikleri 7-12 km

Şekiller incelendiğinde bant genişliğinin yükseklere çıktıkça artacağını bu da Denklem 12’de görüldüğü gibi kapasite artışını sağlayacağı görülmektedir. Şekil 12’de deniz seviyesinde elde edilen 126.06 GHz ve 31.03 GHz bantların irtifanın 4 km olduğu durumda ise 219.71 GHz’ye genişlediği görülmektedir. Şekil 13’de İrtifa 13 km

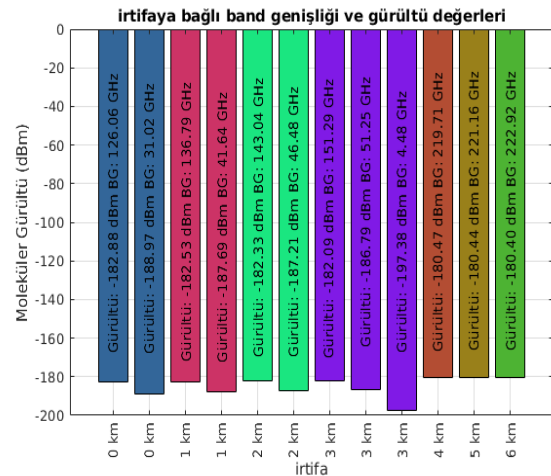
olduğunda 0.10 eşik değerinin altında kalan frekanslarla oluşan bantın genişliğinin ve değerinin 230 GHz olduğu hesaplanmıştır. Çalışmanın diğer bölümlerinde kapasite ve ilişkili parametreler tartışılmıştır.

3.3. Gürültü

Elektromanyetik dalganın ilerlediği ortamdaki madde molekülleri ile etkileşmesi sonucu enerjisinin bir kısmı ısı enerjisine dönüşür. Buna termal gürültü denir. Gürültü kaybı Denklem (10) kullanılarak hesaplanır.

$$L_{Gürültü} = 10 \log_{10} (1000 * k * T * B) \text{ (dBm)} \quad (10)$$

B Hz cinsinden frekans bant genişliği, T sıcaklık birimi Kelvin, k ise Boltzmann sabiti ve değeri yaklaşık olarak 1.3801×10^{-23} J/K eşittir. Denklem (10)’da bant genişliğinin gürültü kaybı üzerindeki doğrusal bir etkisi olduğunu görmekteyiz. Yükseklere çıkıldıkça bant genişliğinin seçilen emilim katsayısı eşik değerine bağlı olarak artacağını elde ettiğimiz emilim katsayılarına bağlı olarak gözlemlenmiştir. Bu bölümde yapılan hesaplamalar Şekil 12 ve 13’teki bant genişlikleri kullanılarak yapılmıştır. Şekil 12’de ilk barda gösterilen deniz seviyesinde hesaplanan banda ait olan Şekil 14’de ilk barda gösterilen gürültü değeri -182.88 dBm hesaplanırken, bant genişliğinin 224.25 GHz olduğu 7 km irtifada gürültü -180.38 dBm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 14. İrtifaya bağlı elde edilen gürültü 0-6 km

Şekil 15 incelendiğinde bant genişliğinin yüksek olduğu 7-12 km irtifalarda gürültünün de arttığı hesaplanmıştır.

Sınırlı bant genişliği, iletilen sinyalde daha az gürültü taşıma eğilimindedir. Şekil 13’te 9. km irtifada ilk dar bant olan 1.62 GHz bandında gürültünün miktarını Şekil 15’de incelediğimizde daha az hesaplandığını gözlemleriz. Band genişliğinin düşük olduğu bu durum yüksek sinyal-gürültü oranıyla sonuçlanır, ancak ilerleyen bölümlerde yüksek SGO oranının her zaman yüksek kapasite ile sonuçlanmadığı analiz edilmiştir.

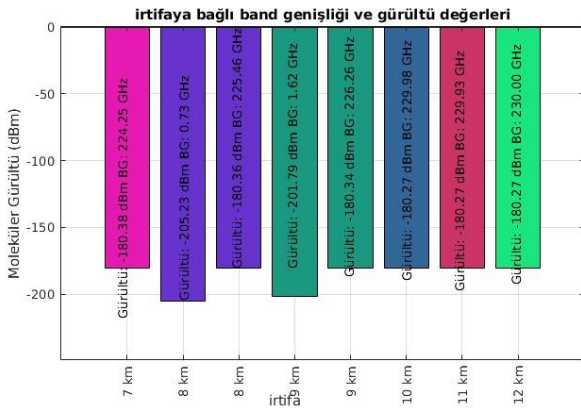
3.4. Sinyal gürültü oranı

Sinyal ortamda ilerlerken iletim gücünün bir kısmını emilme ile yitirir kalan kısmın gürültüden ne kadar büyük olduğu sinyal gürültü oranı ile ifade edilir. Sinyal gürültü oranı sinyalin kalitesi olarak düşünülür. **Denklem (11)**'de SGO değerinin dB cinsinden hesaplanması gösterilmektedir.

$$SGO[dB] = P_{\text{gönderilen}}[dB] - P_{\text{Kaybedilen}}[dB] - \text{Gürültü}[dB] \quad (11)$$

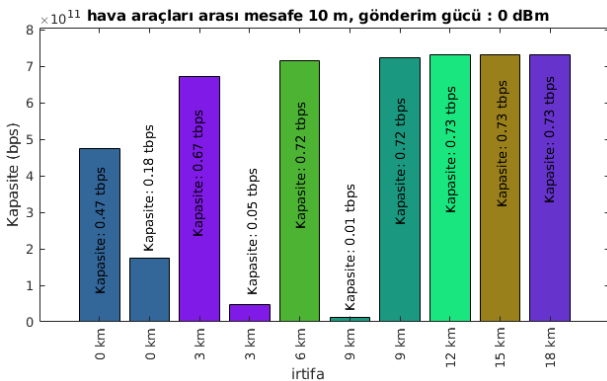
3.4.1. SGO güç ilişkisi

Denklem (11)'de görülen SGO ve güç ilişkisi dB cinsinden gösterilmiştir. **Denklem (11)**'de parametreler incelendiğinde SGO değerinin anten gönderim gücüne bağlı olarak artacağı görülmektedir. Çalışmamızın bu bölümünde SGO hesaplaması yapılırken gönderilen gücün tüm bant frekanslarının alt bant olarak düşünüldüğü her bir bant için ayrı SNR hesaplamasının yapıldığı yöntem yerine; iletim penceresinin tüm bant genişliğini tek bir bant olarak alan bantın ortasındaki frekans taşıyıcı frekans olarak seçen yöntem benimsenmiştir.



Şekil 15. İrtifaya bağlı elde edilen gürültü 7-12 km

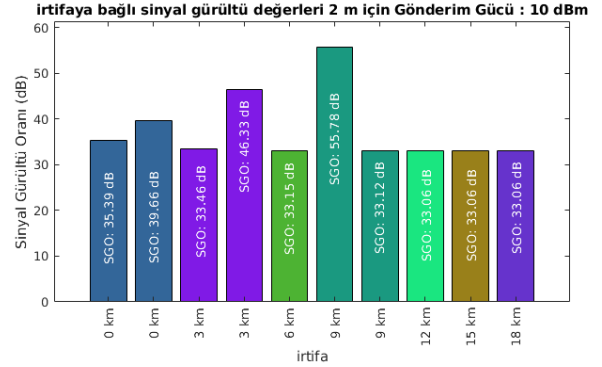
3.4.2. SGO bant genişliği ilişkisi



Şekil 17. 0 dBm anten gücünde 10 m mesafede elde edilen kapasite değerleri

Şekil 16'da 9. km de 1.62 GHz bandında gürültü bant genişliğinden dolayı düşük çıkmıştır. Bu açıdan aynı bantta

elde ettiğimiz SGO değeri de düşük çıkan gürültü değerinden dolayı sinyal büyüklüğünün bir ölçüsü olarak büyük hesaplanmıştır. Bu ilişki bant genişliği, SGO grafiğinde gösterilmiştir.



Şekil 16. 0-18 km irtifalar için hesaplanan SGO değerleri

Buna göre düşük bant genişliği olan bölümlerde yüksek SGO değeri elde edilmiştir. Şekil 16 incelendiğinde 0. km de deniz seviyesinde 2. bantta gürültü daha düşük çıktığı için deniz seviyesinde 2. bantta SGO değeri daha yüksek çıkmıştır. Bu açıdan dar bantın gürültü değeri düşük olmasından dolayı SGO değeri büyük çıkmaktadır. Dar bantın kapasite üzerindeki etkisi kapasite hesaplamasında değerlendirilmiştir.

3.5. Kapasite

Çalışmamızın bu bölümünde THz bandı için kapasite hesabı tartışılmıştır. İlk yaklaşım klasik Shannon Teoremi ile yapılan hesaplamadır. Bu hesaplamada bant genişliğinin düşük ve yüksek frekansı arasında kalan orta frekans taşıyıcı frekans olarak seçilir, iki frekans farkı bant genişliği (B), olarak belirlenir ve kapasite **Denklem (12)**'deki gibi hesaplanır [23].

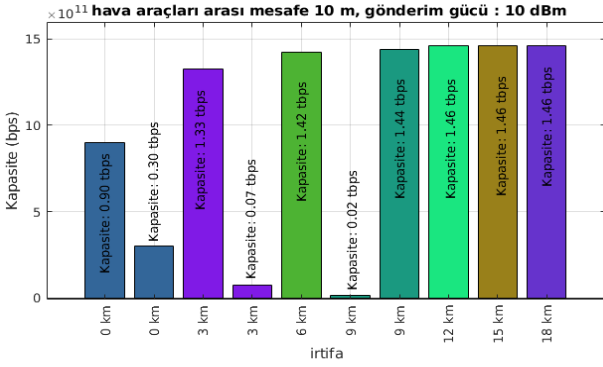
$$C = B \cdot \log_2(1 + SGO) \quad (12)$$

Tüm kayıp hesaplamaları ve kanal modellemesi sadece taşıyıcı frekans kullanılarak hesaplanır. Buradaki dezavantaj ise bant içindeki frekansların göz ardı edilmesidir.

Her frekansın bağımsız olarak taşıyıcı frekans olarak seçildiği birbiri ardına gelen frekansların oluşturduğu her alt bantın bağımsız olarak kapasitelerinin hesaplandığı ve bulunan kapasitelerin **Denklem (13)**'deki gibi ana bant için toplanması ile hesaplanır [24].

$$C(d) = \sum_i \Delta f_i \log_2(1 + SGO_i) \quad (13)$$

Kapasite hesabı yaparken seçilen iletim penceresinin bant genişliğine ve bant genişliğinin gürültüye olan etkisi Şekil 17 ve 18'de gösterilmiştir.



Şekil 18. 10 dBm anten gücünde 10 m mesafede elde edilen kapasite değerleri

Alıcıya ulaşan kayıplı sinyalin gücünün dar bantta düşük çıkan gürültü değerine oranı dar bantta SGO değerinin yüksek çıktığı şeklinde yorumlanmıştır. Şekil 14’te 9 km irtifaya ait 0.10 iletim katsayısının altında kalan iletim katsayıları ile oluşan 2 iletim penceresinden 1.62 GHz bant genişliğine sahip olan bantta hesaplanan gürültü değerleri görülmektedir. Aynı şekilde sinyal gücünün bu gürültü gücüne oranına bakıldığında SGO değerinin yüksek çıktığı Şekil 16’da görülmektedir. Shannon Kapasite formülüne (Denklem (12)) bakıldığında yüksek SGO değerinin yüksek kapasite olmadığı bunun yanında bant genişliğinin büyük olması gerektiği görülebilir. Gönderim gücünün 10 dBm, hava araçları arasındaki mesafenin 10 m olduğu durumlarda çeşitli irtifalarda hesaplanan kapasite değerleri Şekil 18’de görülmektedir. Burada yukarıdaki sözü edilen 9 km irtifada hesaplanan 1.62 GHz’lik bant takip edildiğinde kapasitenin düşük kaldığı görülmüştür. Özetle kapasitenin çok büyük SGO’ya Şekil 16’da gösterilen bantlarda görülen değerlere bağlı olarak yüksek çıkacağı öngörülse de 9. km’deki irtifada hesaplanan 55.78 dB ile SGO’nun en yüksek hesaplandığı ilk barda elde edilen kapasitenin 0.02 tbps olduğu Şekil 17’de görülmektedir. Bu sonuç bize yüksek SGO değeri ile ona eşlik eden geniş bant olmayınca yüksek kapasite elde edilemeyeceğini gösterir. Yükseklerle çıkıldıkça su buharı emiliminin azalması ile iletim penceresinin genişlemesi sonucu artan bant genişliği sebebiyle kapasitenin 1.40 tbps’nin üstünde hesaplanmıştır. 6 km irtifadan sonra madde oranının sabit kalması sebebiyle hesaplanan kapasitelerin değişmediği Şekil 17’de görülmektedir.

3.5.1. Kapasite güç ilişkisi

Bu kısma kadar ele aldığımız konulardan anten gönderim gücü arttıkça alınan sinyal gücünün arttığı ve bunun sonucu olarak SGO’nun artacağı bunun da geniş bantlarda kapasiteyi artıracak çıkarımında bulunabiliriz. 0 dBm ve 10 dBm anten verici gücü kullanılarak çeşitli irtifalarda 0.10 eşik emilim değerleri ile oluşan bantlarda aralarında 10 m mesafe bulunan hava araçlarının elde ettikleri kapasite Şekil 17 ve 18’de görülmektedir. Şekillere bakıldığında anten gönderim gücünün 0 dBm olduğu durumda 0. km deniz seviyesinde aralarında 10 m mesafe olan iki hava aracı arasındaki mesafede elde edilen kapasitenin 0.47 tbps olduğu, aynı araçların 10 dBm güç kullanılarak kurdukları iletişimde kapasitenin 0.90 tbps

olduğu görülmüştür. Bu açıdan Şekil 17 ve 18 incelendiğinde anten gücü arttıkça kapasitenin de arttığını gözlemlemekteyiz. Buna göre kapasite ile anten gücü arasında doğrusal ilişki olduğu görülmektedir.

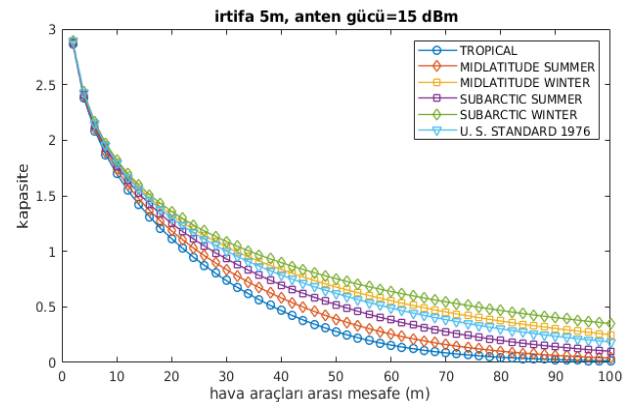
3.5.2. Kapasite hava modelleri ilişkisi

Farklı hava modelleri içerisinde farklı maddeler olmasından dolayı farklı geçirgenliklere sahip olmaktadır. SSRAM’de modellenmiş ve içeriği Tablo 1’de gösterilen altı farklı hava modeli bulunmaktadır. SSRAM’de bulunan hava modelleri farklı madde oranlarına sahiptir. Bu madde oranlarının THz dalgaları üzerindeki etkisini görmek amacıyla her bir hava modeli için kapasite hesaplanmıştır. Hesaplama sonucunda elde edilen kapasite, hava modeli arasındaki ilişki Şekil 19’da görülmektedir.

Tablo 1 SSRAM hava modelleri ve madde içerikleri [25]

Hava Modelleri	Maddeler			
	Su	Karbondioksit	Oksijen	Azot
Tropikal	11.02	0.14	88.84	-
Orta Enlem Yazı	8.22	0.14	91.63	-
Orta Enlem Kışı	2.02	0.15	97.82	-
Subarktik yaz	5.40	0.15	94.45	-
Subarktik Kış	0.67	0.16	99.18	-
U.S. Standart, 1976	0.78	0.03	20.94	78.25

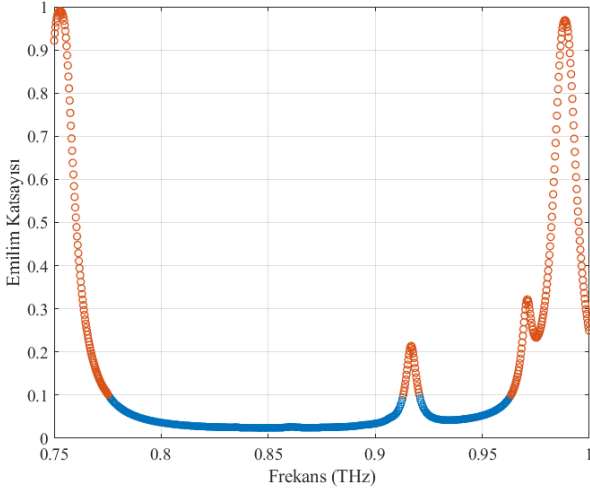
Şekil 19’da elde edilen değerler 5 m irtifada bulunan, aralarındaki mesafenin 100 m’ye kadar çıktığı hava araçları için hesaplanan iletişim kapasitesi görülmektedir. Buna göre hava araçları arasındaki mesafe arttıkça tüm hava modellerinde emilim ölçüsünde kapasite düşüşü görülmüştür. Tabloya bakıldığında farklı hava modellerinin içerisinde bulunan su buharı, oksijen, karbondioksit ve azot değerlerinin farklı olduğunu görmekteyiz. Şekil 19’a bakıldığında en düşük kapasite, su buharının en yoğun olduğu tropikal modelde hesaplanmıştır. Su buharı etkisinin en az olduğu U.S. Standart 1976 modelinde kapasitenin daha yüksek çıkması beklenirken azot ve oksijen etkisiyle kapasitenin Orta Enlem Yazı’ndan daha az çıktığı görülmüştür.



Şekil 19. Hava modeli kapasite, mesafe ilişkisi

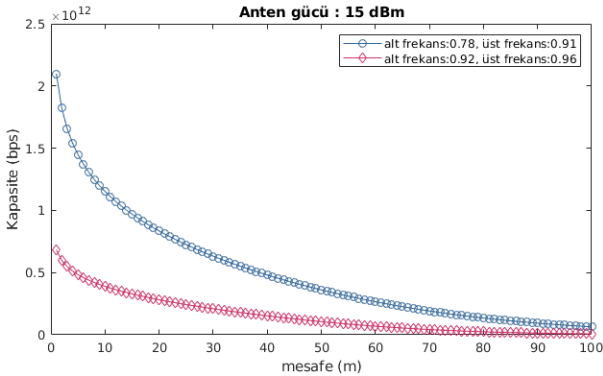
3.5.3. Kapasite iletim penceresi ilişkisi

Çalışmamızın bu bölümüne kadar yapılan hesaplamalarda eşik emilim katsayısı değerinin altında kalan değerlerle oluşan iletim penceresinin bant genişliği kullanılmıştır. Çalışmamızın bu bölümünde ise eşik değerin üstünde alınan değerlerle elde edilmiş iletim pencerelerinin bant genişlikleri ve hesaplanan kapasiteler tartışılacaktır. **Şekil 20** incelendiğinde 0.10 eşik değerinin altında mavi renkli iki adet iletim penceresinin olduğu görülmektedir.

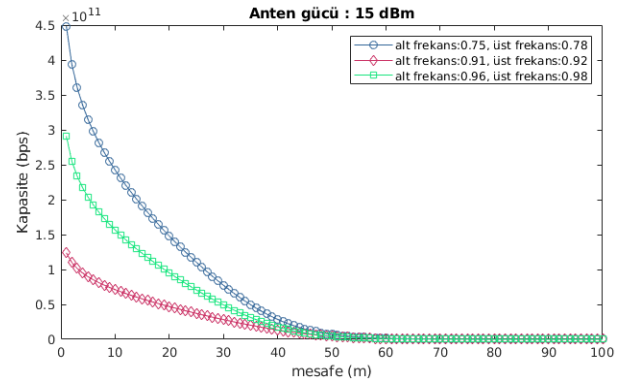


Şekil 20. Eşik emilim katsayısı(0.10) ile belirlenen iletim penceresi(mavi)

Bu iletim pencerelerinin bant genişliği olarak, birisi dar (0.92-0.96 THz) bant, diğeri ise geniş banttır (0.78-0.91 Thz). Eşik değerinin üstünde yer alan ve emilimin yüksek olduğu frekanslarda hesaplanan iletim pencereleri de bordo ile gösterilmiştir. Eşik emilim değerlerinin altındaki frekans bölgeleri iletim penceresi olarak seçildiğinde hava araçları arasındaki mesafeye bağlı olarak hesaplanan kapasitelerin **Şekil 21**'de görülmektedir. Burada aralarında 10 m mesafe bulunan iki hava aracının aralarındaki iletim kapasitesi dar bant için 0.35 tbps iken geniş bantta iletim 1.35 tbps seviyesindedir. Eşik değerinin üstünde yer alan frekans değerleri için elde edilen bantlar ile hesaplanan kapasiteler **Şekil 22**'de görülmektedir.



Şekil 21. Eşik emilim katsayısı (0.10) altındaki iletim penceresi (mavi) bant kapasite mesafe ilişkisi



Şekil 22. Eşik emilim katsayısı(0.10) üstünde bant kapasite mesafe ilişkisi

Buna göre eşik değeri 0.10 nun üstünde olduğu için emilim daha da artmıştır. Emilimin çok olması sebebiyle aralarında 10 m mesafe bulunan iki hava aracı arasındaki kapasite maksimum 0.45 tbps elde edilmiştir. **Şekil 22**'de görüldüğü gibi tüm bantlarda hava araçları arasında 40 m mesafe bulunduğu durumda iletişimin koptuğu, **Şekil 21**'de ise iletişim mesafesinin aynı şartlarda 70 m mesafeden sonra koptuğunu görmekteyiz. Bu da bize THz gibi ortam hassasiyeti yüksek EM dalgalarla kurulan iletişimde iletim penceresi ve bu pencerenin genişliğini belirleyen emilim katsayısı parametrelerini göz önüne almayı gerektirir.

4. Sonuç

İletişimde ortam hassasiyeti yüksek THz bandını kullanan hava araçlarının arasında kurulan bağlantının kapasitesinin anten gönderim gücü, iletim katsayısı ve onu etkileyen irtifa, hava modellerine bağlı olarak nasıl değiştiği açıklanmıştır. Her ortamda her frekansta iletişim gerçekleşmez, bazı frekanslar bazı madde moleküllerinin titreşmesine sebep olurken bazı frekanslarda ise bu olay gerçekleşmez. İrtifa arttıkça THz dalgalarının etkileştiği maddesel yoğunluğun azalması sebebiyle iletim pencerelerinin genişlediği gösterilmiştir. THz iletişimde kapasitenin hesaplama şekilleri tartışılmıştır. Hava araçlarının buldukları hava modellerine bağlı olarak elde edilen kapasiteler, içerisinde su buharı bulunan maddesel ortamda diğer ortamlara göre su buharının emilimi sebebiyle düşük çıkmıştır. Ayrıca bu çalışmada 0.75-1 THz aralığında 0.10 eşik değerinin altında (**Şekil 20**, mavi renkli) ve üstünde kalan (**Şekil 20**, bordo renkli) frekanslarda belirlenen iletim penceresini kullanan bantlarda elde edilen kapasiteler de tartışılmıştır. İletim katsayılarının yüksek olduğu iletim pencerelerinde elde edilen kapasitenin yüksek, emilim kaybından dolayı düşük çıktığı görülmüştür. Bu sebeple THz bandında iletişim kuran hava araçlarının modellenmesinde emilim katsayılarının, ortam türünün, hava aracı irtifasının göz önünde bulundurulması gereken önemli bir metrik olduğunu anlaşılmıştır. Bu çalışmada elde edilen bulgular, THz iletişim sistemlerinin tasarımında ortamın etkilerinin göz ardı edilemeyeceğini göstermiştir. Farklı maddelerin THz dalgalarını farklı frekanslarda emme özellikleri, iletişim kalitesini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, çeşitli malzemelerin THz emilim özelliklerinin deneysel olarak

belirlenmesi ve bu verilerin yapay zeka algoritmaları ile modellenmesi, THz iletişim sistemlerinin daha doğru ve verimli bir şekilde tasarlanmasına olanak sağlayacaktır. Doğru bant ve frekans seçimi, anten gücü ve atmosferik koşulların titizlikle değerlendirilmesiyle, THz bandı, sanal ve artırılmış gerçeklik uygulamaları gibi alanlarda yüksek kaliteli, gerçek zamanlı ve etkileşimli deneyimler sunabilecek dokunsal internetin temelini oluşturacaktır. Bu çalışmamız, bu açıdan dokunsal internetin geleceği için önemli bir adım olup, bu alandaki araştırmalara öncülük edecektir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %19

Kaynaklar

- [1] C.-X. Wang, F. Haider, x. Gao, Y Yang ve D Yuan Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks. *IEEE Communications Magazine*, 52(2), 122–130, 2014. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6736752>
- [2] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan ve M. Zorzi, Toward 6G networks: use cases and technologies, *IEEE Commun. Mag.*, 58 (3), 55–61, 2020. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900411>
- [3] W. Saad, M. Bennis ve M. Chen, A Vision of 6G wireless systems: applications, trends, technologies, and open research problems, *IEEE Netw.*, 34 (3), 134–142, 2020. <https://doi.org/10.1109/MNET.001.1900287>
- [4] X. You vd., Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts, *Sci. China Inf. Sci.*, 64(1),110301 , 2020. <https://doi.org/10.1007/s11432-020-2955-6>
- [5] T. Taleb, A. Boudi, L. Rosa, L. Cordeiro, T. Theodoropoulos ve K. Tserpes, Toward supporting XR services: architecture and enablers, *IEEE Internet Things J.*, 10(4), 3567–3586, 2023. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3222103>
- [6] A. Ahad, Z. Jiangbina, M. Tahir, I. Shayea, M. A. Sheikh ve F. Rasheed, 6G and Intelligent healthcare: taxonomy, technologies, open issues and future research directions, *Internet Things*, 25, 101068, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101068>
- [7] S. Mihai vd., Digital Twins: A survey on enabling technologies, challenges, trends and future prospects, *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 24 (4), 2255–2291, 2022. <https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3208773>
- [8] S. Ghafoor, N. Boujnah, M. H. Rehmani ve A. Davy, MAC Protocols for terahertz communication: A comprehensive survey, *arXiv*, Jul. 2020, <http://arxiv.org/abs/1904.11441> (erişim tarihi: 07 Şubat 2024).
- [9] M. Z. Asghar, S. A. Memon ve J. Hämäläinen, Evolution of wireless communication to 6G: potential applications and research directions, *Sustainability*, 14(10), 6356, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14106356>
- [10] T. Schneider, Ultrahigh-Bitrate Wireless data communications via THz-Links; possibilities and challenges, *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, 36 (2), 159–179, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10762-014-0100-1>
- [11] M. A. Akkaş, Terahertz wireless data communication, *Wireless Networks*, 25 (1), 145–155, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11276-017-15>
- [12] H. T. Friis, A Note on a simple transmission formula, *Proc. IRE*, 34 (5), 254–256, 1946. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1946.234568>
- [13] M. W. Shephard vd., Performance of the Line-by-Line Radiative Transfer Model (LBLRTM) for temperature and species retrievals: IASI case studies from JAIVEx, *Atmospheric Chem. Phys.*, 9 (19), 7397–7417, 2009. <https://doi.org/10.5194/acp-9-7397-2009>
- [14] S. Mahboob ve L. Liu, Revolutionizing future connectivity: A contemporary survey on AI-empowered satellite-based non-terrestrial networks in 6G, *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 26 (2), 1279–1321, 2024. <https://doi.org/10.1109/COMST.2023.3347145>.
- [15] A. I. Alshbatat ve L. Dong, Adaptive MAC Protocol for UAV communication networks using directional antennas, 2010 International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC), sayfa 598–603, Chicago, IL, USA, 2010. <https://doi.org/10.1109/ICNSC.2010.5461589>.
- [16] R. R. Choudhury ve N. H. Vaidya, Deafness: A MAC problem in ad hoc networks when using directional antennas, *Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Network Protocols*, sayfa 283–292, Berlin, Germany, 2004, <https://doi.org/10.1109/ICNP.2004.1348118>.
- [17] X.-W. Yao ve J. M. Jornet, TAB-MAC: Assisted beamforming MAC protocol for Terahertz communication networks, *Nano Commun. Netw.*, 7, 2016.
- [18] N. Abuzainab, M. Alrabeiah, A. Alkhateeb ve Y. E. Sagduyu, Deep Learning for THz drones with flying intelligent surfaces: Beam and Handoff Prediction, *ArXiv*, Feb. 2021, <http://arxiv.org/abs/2102.11222> (erişim tarihi: 06 Ekim 2021)
- [19] Q. Xue vd., A Survey of beam management for mmWave and THz communications towards 6G, *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 2024. <https://doi.org/10.1109/COMST.2024.3361991>
- [20] D. F. Swinehart, The beer-lambert law, *J. Chem. Educ.*, 39 (7), 333, 1962. <https://doi.org/10.1021/ed039p333>
- [21] J. M. Jornet ve I. F. Akyildiz, Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the Terahertz band, *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, 10 (10), 3211–3221, 2011. <https://doi.org/10.1109/TWC.2011.081011.100545>
- [22] A. Saeed, O. Gurbuz ve M. A. Akkaş, Terahertz communications at various atmospheric altitudes, *Phys. Commun.*, 41, 101113, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2020.101113>
- [23] Shannon, C. E. (1948). a mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3),

- 379–423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- [24] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge University Press, 2005, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511841224>.
- [25] G. Anderson vd., *AFGL Atmospheric constituent profiles (0-120km)*, Mayıs 1986.





Güneş panellerinin üretim ve kurulum süreçlerinde verimliliği belirleyen faktörlerin analizi

Analysis of factors determining efficiency in the production and installation processes of solar panels

Gamze Güven¹ , Ayşe Kocalmış Bilhan^{2,*} 

^{1,2} Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 50200, Nevşehir Türkiye

Öz

Dünya enerji talebinin artmasıyla birlikte, sınırlı fosil yakıt kaynakları ve bunların çevresel etkileri göz önüne alındığında, güneş enerjisi alternatif bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, fotovoltaik panellerin verimliliği üzerindeki etkilerin daha detaylı bir şekilde anlaşılması, güneş enerjisi teknolojisinin geliştirilmesi ve daha verimli enerji üretimi için önem taşımaktadır. Güneş panellerinin tasarımında kullanılan malzemelerin seçimi, üretim teknikleri ve test süreçlerinin, panelin nihai verimliliği üzerinde belirleyici olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada, güneş paneli tasarımı ve üretimindeki değişkenlerin verimlilik üzerindeki etkilerin sistematik bir şekilde analiz edilmesi amaçlanmıştır. Tasarlanan güneş panelleri üzerinde, Sun-Simulator cihazı kullanılarak farklı durumlar için testler yapılarak, bu panellere ait akım-gerilim (I-V) karakteristikleri elde edilmiştir. Gölgeleme, kirlilik, gibi çevresel faktörler ile çeşitli fiziksel faktörlerin güneş panellerinin verimliliği üzerindeki etkileri de detaylı bir şekilde incelenmiş ve analiz edilmiştir. Bu çalışma, güneş enerjisi teknolojisinin verimliliğini artırmaya ve sürdürülebilir enerji uygulamalarını optimize etmeye katkıda bulunmayı hedeflemektedir.

Anahtar kelimeler: Enerji, Fotovoltaik panel, Güneş panelleri, Kayıplar, Solar hücreler, Verim.

1 Giriş

Güneş enerjisi, çağımızın en önemli ve sürdürülebilir enerji kaynaklarından biri olarak giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Dünya enerji talebinin artmasıyla birlikte, fosil yakıtların sınırlı kaynakları ve çevresel etkileri göz önüne alındığında, güneş enerjisi alternatif bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, fotovoltaik panellerin verimliliği üzerindeki etkilerin daha detaylı bir şekilde anlaşılması, güneş enerjisi teknolojisinin geliştirilmesi ve daha verimli enerji üretimi için hayati önem taşımaktadır [1,2].

Yenilenebilir enerji kaynakları, elektrik enerjisi üretiminde giderek artan bir öneme sahiptir. Hidroelektrik enerji, güneş enerjisi, rüzgar enerjisi ve jeotermal enerji gibi çeşitli kaynaklar, elektrik üretiminde kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları arasındadır. Güneş enerjisi, fotovoltaik

Abstract

With the increasing global energy demand and the limited fossil fuel resources along with their environmental impacts, solar energy emerges as an alternative solution. In this context, a more detailed understanding of the factors affecting the efficiency of photovoltaic panels is crucial for the development of solar energy technology and more efficient energy production. It is well known that the choice of materials used in the design of solar panels, production techniques, and testing processes are decisive for the final efficiency of the panel. Therefore, this study aims to systematically analyze the effects of variables in the design and production of solar panels on their efficiency. By conducting tests on the designed solar panels using a Sun-Simulator device, the current-voltage (I-V) characteristics of these panels under different conditions were obtained. The effects of environmental factors such as shading and pollution, as well as various physical factors, on the efficiency of solar panels were also examined and analyzed in detail. This study aims to contribute to enhancing the efficiency of solar energy technology and optimizing sustainable energy practices.

Keywords: Efficiency, Energy, Losses, Photovoltaic panel, Solar cells, Solar panels.

hücreler vasıtasıyla güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürürken, rüzgar enerjisinde mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi durumu söz konusudur. Bu ve benzer doğal kaynakların elektrik enerjisi üretiminde kullanılması, gelecekte yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki rolünün daha da önemli bir hale geleceğini göstermektedir [3,4].

Güneş enerjisi, sürdürülebilir ve temiz bir enerji kaynağı olmasının yanı sıra, dünya genelinde bol miktarda bulunması nedeniyle kullanımı yaygınlaşmaktadır [5,6]. Taşınabilir cihazlardan, araçlara, konutlardan şebekeye bağlanmalarına kadar hemen her alanda kullanımı yaygınlaştırılmakta ve güneş enerjisi teknolojileri yapılan çalışmalarla sürekli geliştirilmektedir [7].

Güneş enerjisinden yararlanmak için kullanılan fotovoltaik sistemler ise güneş enerjisini elektrik enerjisine

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: akbilhan@nevsehir.edu.tr (A. Kocalmış Bilhan)
Geliş / Received: 19.08.2024 Kabul / Accepted: 04.09.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1535918

dönüştüren özel fotovoltaik hücrelerden oluşur. Bu hücreler, doğrudan güneş ışığını emerek düşük gerilim ve akımda elektrik üretir. Ancak, üretilen bu elektrik enerjisinin pratik olarak kullanılabilmesi için fotovoltaik hücrelerin belirli bir düzen içerisinde birleştirilmesi gerekir. Fotovoltaik hücreler, öncelikle paralel ve seri bağlantılarla modüller oluşturur. Bu modüller, yine seri ve paralel bağlantılarla bir araya getirilerek PV panelleri meydana getirir. Son olarak, PV panellerinin benzer şekilde birbirine bağlanmasıyla daha büyük ölçekli diziler oluşturulur. Bu yapı sayesinde güneş enerjisinden elde edilen elektrik enerjisi, çeşitli uygulamalarda kullanılabilir hale gelir [8, 9]. 2000'li yıllara kadar güneş hücresinin gelişiminde oldukça hızlı bir ilerleme olmuştur. 2000'li yılların ortalarından itibaren ise, ince film güneş hücreleri gibi yeni teknolojilerin geliştirilmesi hız kazandı. Bu tür güneş hücreleri, geleneksel silikon tabanlı hücrelere kıyasla daha düşük maliyetlerle üretilebilir ve çeşitli uygulama alanlarında esneklik sağlamaktadır. 2007'de, Lungenschmied ve arkadaşları, poli(3,4-etilendioksitiyofen) ve polistiren sülfonat kullanarak esnek yüzeylere kaplanabilen bir güneş pilinin verimini %1,5 olarak belirlemiştir [10]. Liang ve meslektaşları, thienolitiyofen ve benzo ditiyofen kullanarak geliştirdikleri güneş pilleri ile %7,4'lük bir verim elde etmiştir [11]. Polyera adlı Amerikan firması, PEDOT-PSS polimer malzemesi kullanarak organik tabanlı güneş pillerinde %9,1 verim elde etmiştir [12]. Tascioglu'nun Bursa ilinde monokristal ve polikristal güneş panellerinin karşılaştırılması üzerine yapılan bir araştırmada ise, toplam ve direkt güneş ışınım değerlerinin belirlendiği ve panellerin zamana ve toplam ışınımına bağlı güç değerlerinin hesaplandığı ortaya çıkmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, her iki panel türü de aynı toplam güneş ışınımı değeri olan 1001.13 W/m² altında değerlendirilmiştir. Bu koşullar altında, monokristal güneş panelinden elde edilen ortalama güç miktarı 87.14 W iken, polikristal güneş panelinden elde edilen ortalama güç miktarı ise 80.17 W olarak hesaplanmıştır. Bu bulgular, monokristal güneş panellerinin, polikristal güneş panellerine kıyasla % 4.1 daha fazla anlık güç ürettiğini göstermektedir [13]. Ayrıca, güneş enerjisi depolama teknolojilerindeki ilerlemeler, güneş enerjisinin sürekli ve istikrarlı bir kaynak olarak kullanılmasını sağlamıştır. Aküler, termal depolama sistemleri ve hidrojen depolama çözümleri gibi çeşitli depolama yöntemleri, güneş enerjisinin etkin bir şekilde kullanılmasına katkıda bulunmuştur.

Fotovoltaik hücrelerin yanı sıra, güneş enerjisi sistemlerinde önemli bir role sahip olan bir diğer unsur fotovoltaik modüllerdir. Bu modüller, bir araya getirilmiş fotovoltaik hücrelerden oluşur ve genellikle koruyucu bir çerçeve içine monte edilmiştir. Çeşitli boyutlarda ve şekillerde bulunabilen bu modüller, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürmek için tasarlanmıştır. Fotovoltaik diziler ise, modüllerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan sistemlerdir. Bu diziler, genellikle güneş enerjisi tarlalarında veya büyük ölçekli güneş enerjisi santrallerinde kullanılır.

Güneş panellerinde kullanılan hücreler monokristal ve polikristal silikon hücreler gibi farklı teknolojik temellere dayanmaktadır. Monokristal hücreler, tek bir kristal yapısından oluşur ve homojen bir yapıya sahiptirler [14,15].

Bu yapıları, yüksek enerji dönüşüm verimliliği sağlar ve fotovoltaik sistemlerin performansını artırır. Polikristal hücreler, birden fazla kristal yapısının bir araya gelmesiyle oluşur ve bu durum onlara daha düzensiz bir yapı kazandırır [14,16]. Bu düzensiz yapı, enerji dönüşüm verimliliklerinin genellikle monokristal hücrelere kıyasla daha düşük olmasına neden olur [17].

Güneş panelleri, içerdikleri hücrelerin elektriksel özelliklerini optimize etmek amacı ile seri ve paralel bağlantılarla düzenlenir. Seri bağlantılar pozitif kutupları negatif kutuplarla birleştirerek voltajı artırır. Paralel bağlantılar ise akımı artırarak panellerin toplam verimini optimize eder.

Hücreler ince metal tellerle birbirine bağlanır. Bu teller, güneş panellerinin içinden geçen elektrik akımını toplar ve biriktirir. Elektrik akımının etkin bir şekilde hareket etmesini sağlamak için akım yolları özenle tasarlanmaktadır. Güneş hücreleri özel bir destek tabakası ile güçlendirilmektedir. Dış etkilere karşı korumak için de bir cam tabaka ile kaplanmaktadır. Bu destek tabakası ve cam kaplama, hücrelerin dayanıklılığını artırır ve uzun vadeli performans garantisi verilmektedir.

Paneller, genellikle sağlam bir alüminyum çerçeve içine monte edilmektedir. Bu çerçeve, panellerin yapısal dayanıklılığını artırır ve montaj işlemini kolaylaştırır.

Güneş panellerinin verimini etkileyen birçok faktör vardır. Bu faktörlerin birçoğu güneş enerji santrallerinde ve üretimde kayıplara yol açmaktadır. Bu kayıpların bazıları çevresel (sıcaklık, tozlanma, rüzgar) olmakla birlikte bazıları da sistemeldir (gölgeleme, AC ve DC kayıplar) [18]. Diğer kayıplar ise güneş panelinin üretim aşamasında kullanılan malzemelerin kalitesiyle alakalıdır [19].

Bu araştırma, farklı güneş paneli tasarımlarının ve üretim süreçlerinin verimliliği üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışma, güneş panellerinde kullanılan malzemelerin, üretim tekniklerinin ve test süreçlerinin verimlilik üzerindeki rolünü analiz etmektedir. Araştırma kapsamında, farklı güç değerlerine sahip güneş panelleri tasarlanmış ve Sun-Simulator cihazı ile test edilmiştir. Elde edilen veriler, panel performansını belirlemek ve çevresel faktörlerin etkilerini değerlendirmek için kullanılır. Ayrıca, sahadan alınan geri dönüşler aracılığıyla arızalı panellerin nedenleri tespit edilerek, üretim ve tasarım süreçlerinin iyileştirilmesine yönelik öneriler sunulmuştur.

2 Materyal ve metod

2.1 Panelin üretimi

Bu çalışmada kullanılan güneş panelleri, bifacial multi busbar hücreler ve transparan backsheet gibi son teknolojiye sahip özelliklerle donatılmıştır. Bifacial özelliği, güneş panelinin hem ön yüzeyinden hem de arka yüzeyinden ışık toplayabilme yeteneğini ifade ederken, transparan backsheet ise panelin arka kısmında kullanılan malzemenin ışığı geçirgen olmasını sağlar. Ayrıca, panelde bulunan G12 Multi BB hücreler, birden fazla busbar kullanımıyla elektrik akımının daha etkili bir şekilde toplanmasını sağlar. Bu özelliklerin yanı sıra, 210mm G12 Mono-Perc hücrelerin kullanılması da panelin verimliliğini artırmak için önemli bir katkı sağlamaktadır. Yapılan bu çalışmada ise, kullanılan

güneş paneli özelliklerinin güneş enerjisi sistemlerinin performansını değerlendirmede kritik bir öneme sahip olduğu belirtilmektedir. Çalışmanın ilk aşaması, panelin üretimi sürecini kapsamaktadır. Bu süreçte, monokristal hücreler kullanılarak panel üretilmiştir. Hücreler hücre makinasında ortadan ikiye kesim işlemi tamamlandıktan sonra panelin tasarımı için stringer makinasında ribbon teller ile bağlantıları yapılmaktadır. Her bir hücre, stringer makinasından geçirilerek ara bağlantıları yapılmış ve hücrelere yerleştirilerek lehimlenmiş ve elektrik bağlantıları oluşturulmuştur. Ardından, temperli cam üzerine EVA (Etil Vinil Asetat) ve EVA üzerine string haline hücreler yerleştirilerek panel düzeni oluşturulmuştur. Daha sonra, Auto Bussing makinasında busbarlara lehimleme işlemi gerçekleştirilmiştir. İşlemi tamamlanan hücreler, lamine cihazı için tekrar EVA üzerine yerleştirilmiş ve buna ek olarak backsheet denilen malzeme en üste yerleştirilmiştir. Son olarak, lamine cihazında 2 aşamalı şekilde ısıtılarak panelin hücrelerinin hava almasını engelleyerek hazır hale getirilmiştir. Laminasyon işlemi yapılır iken panel 145°C derecede evalar ısıtılarak hücrenin hava alması engellenir ve 2 aşamalı şekilde ısıtma işlemi tamamlandıktan sonra soğutma işlemi için çıkarılır. Üretim sürecinin tamamlanmasının ardından, panel çerçeveleri ve diyetleri takılarak test edilmeye hazır hale getirilmiştir.

2.2 Sun-Simulator test cihazı ile panellerin test edilmesi

Araştırmada kullanılan güneş panelleri, 680W güç üreten polikristal half-cut hücrelere sahiptir. Bu paneller, yüksek enerji verimliliği ve mükemmel performans sağladığı için tercih edilmiştir. Güneş panellerinin performansını değerlendirmek için kullanılan sun simülatör, laboratuvar koşullarında kontrollü bir ortam sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Bu sistem, güneş ışığı benzeri bir spektrum üreterek panellerin çeşitli koşullarda nasıl tepki verdiğini simüle etmektedir.

Üretilen panelin test edilme sürecinde, panelin normal performansını doğrulamak amacıyla 680 W etiket değerine sahip olduğu belirlenen bir simülasyon ortamında kapsamlı bir test yapılmıştır. Bu test sırasında panelin elektriksel verimliliği, dayanıklılığı ve güvenilirliği detaylı bir şekilde incelenmiştir. Test sırasında pozitif ve negatif kutupların bağlantısı yapılmıştır. Testler, 1000W/m² ışık şiddetinde gerçekleştirilmiş ve bu veriler panelin performansını belirlemek için kullanılmıştır. İlk olarak, panelin normal ve gölgeli durumları karşılaştırılmıştır. Işık şiddeti farklılıklarının etkilerini değerlendirmek amacıyla panel, 372.77W/m², 681.1W/m² ve 996.81W/m² ışık şiddetlerinde test edilmiştir. Tozlanmanın etkilerini incelemek için, panelin kirliliği ve tozlu hali ile temizlendikten sonraki performansı karşılaştırılmıştır. Ayrıca, aynı watt değerine sahip monokristal ve polikristal paneller, aynı saat diliminde aküleri doldururken gerilim farklılıklarına göre verimlilikleri değerlendirilmiştir. Son olarak, hücrelerin aşırı ısınma nedeniyle yanmış olduğu ve bu yüzden panelin hiçbir güç üretmediği gözlemlenmiştir. Bu çeşitli testler, güneş panellerinin performansını etkileyen faktörleri anlamak ve panel verimliliğini optimize etmek için önemli veriler sağlamıştır.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Gölgeleme

Bu çalışmada, güneş panelinin gölgeleme koşullarında nasıl tepki verdiğini anlamak ve gölgelemenin panel performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla 680 W değerindeki standart bir güneş paneli seçilmiştir. Bu panel üzerinde gölgeleme etkisini incelemek için opak bir malzeme olarak kâğıt tercih edilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, güneş paneli normal ışık koşullarında test edilirken, ikinci aşamada panel üzerine kâğıt yerleştirilerek tekrar test edildi. İki aşamalı test ile panelin çalışma performansına gölgelemenin etkisinin nasıl olduğu ve güneş ışığına maruz kalan alanın azalmasıyla değişimin nasıl olacağı daha ayrıntılı bir şekilde incelenebilmiştir.

Normal ışık koşulunda test aşamasında, ilk olarak güneş panelinin, güneş simülasyon ortamında pozitif ve negatif kutup bağlantıları yapılmıştır. Bu süreçte panelin çıkış verileri kaydedilmiş ve analiz için belirlenen veri setine eklenmiştir.

Gölgeli ışık test aşamasında ise, Şekil 1 ile gösterildiği gibi belirli bir bölgenin gölge altında kalabilmesi için aynı panel üzerine, bir opak malzeme olan kâğıt yerleştirilmiştir. Şekil 2'de ise panele üzerinde bir bölgeye kâğıt yerleştirilmesi sonucunda panelin arka yüzüne ait bir resim verilmektedir. Daha sonra, pozitif ve negatif kutup bağlantıları yapılarak panel tekrar test edilmiş ve çıkış verileri kaydedilmiştir.

Elde edilen veriler, güneş panelinin farklı çalışma koşullarında gösterdiği davranışları daha ayrıntılı bir şekilde analiz etmek için kullanılmıştır. Normal ışık koşullarda test edilen panel, Şekil 3 ile gösterilen I-V değişim değerine sahip olurken, gölgeli durumda karşılaşılan I-V değişimi Şekil 4 ile verilmektedir. Normal ışık koşullarında beklenen bir güç değerine ulaşılrken, gölge durumunda güç değeri ve verimin belirgin şekilde azaldığı gözlemlenmiştir.

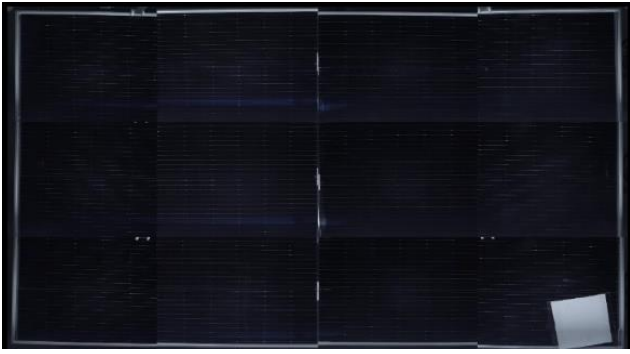
Gölgeleme, güneş panelinin bir kısmının ışık almasını engellediğinden, panelin toplam verimliliği üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Panel üzerine yerleştirilen opak malzeme (kâğıt) ile oluşturulan gölge, güneş panellerinin verimliliğini azaltmış ve bu durum güneş panelinin enerji üretim kapasitesini önemli ölçüde etkilemiştir. Normal ışık koşulunda ve gölgeli ışık koşulunda elde edilen sonuçlar Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Gölgeleme testi sonucundaki veriler

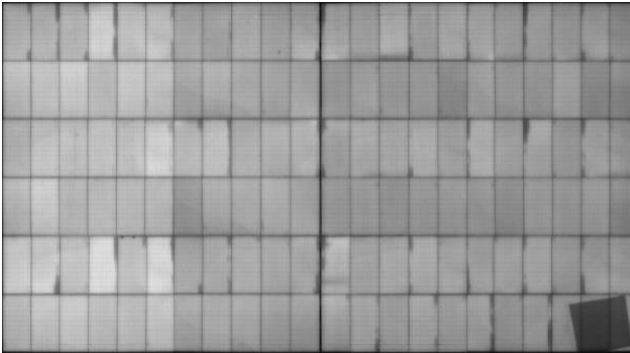
Gölgelememiş Durum	Gölgeleme Durumu
I _{sc} = 19.6695 A	I _{sc} = 19.7241 A
V _{oc} = 45.798 V	V _{oc} = 45.677 V
I _m = 18.6801 A	I _m = 14.775 A
V _m = 37.788 V	V _m = 39.886 V
Doluluk Faktörü (F.F.) = %78.36	Doluluk Faktörü (F.F.) = %65.41
I _{load} = 19.7131 A	I _{load} = 19.7808 A
V _{load} = 10 V	V _{load} = 10 V
Güneş Işını = 996.52 W/m ²	Güneş Işını = 995.72 W/m ²
Ortam Sıcaklığı = 21.1°C	Ortam Sıcaklığı = 21.1°C
Panel Sıcaklığı = 17°C	Panel Sıcaklığı = 17.1°C
R _s = 0.42879 Ω	R _s = 0.3919 Ω
R _{sh} = 99821.37049 Ω	R _{sh} = 99417.37543 Ω
Panel Çıkış Gücü = 705 W	Panel Çıkış Gücü = 689 W
Verimlilik (Eff) = %22.68	Verimlilik (Eff) = %18.94

Gölgelenmenin olmadığı durumda panelin verimliliği %22.68 olarak elde edilirken, gölgelenme olduğu durumda bu değer %18.94 olarak ölçülmüştür. Gölgelenme sonucunda panelin verimliliğinde %3.74'lük bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, panelin akım ve gerilim karakteristiklerinin gölgelenme nedeniyle değiştiğini ve dolayısıyla panelin güç üretiminde azalma olduğunu göstermektedir.

Bu sonuçlar, güneş enerjisi sistemlerinin kurulumu ve performansı ile ilgili yapılan çalışmalar için oldukça önemlidir. Gölgelenme riskinin dikkate alınması, güneş panelinin en iyi performansını sağlamak için alınacak önlemlerin belirlenmesine yardımcı olacaktır. Bu bağlamda, güneş panellerinin montajında ve yerleştirilmesinde gölgelenme risklerinin minimize edilmesi gerekmektedir.



Şekil 1. PV panel kağıt koyulmuş ön yüz görünümü



Şekil 2. PV panel kağıt koyulmuş arka yüz görünümü



Şekil 3. Normal ışık koşulunda I-V grafiği



Şekil 4. Gölgeli ışık koşulunda I-V grafiği

3.2 Hücre sıcaklığı

Çalışmanın bir diğer aşamasında güneş panelinin hücrelerindeki çatlaklardan kaynaklı aşırı ısınan hücre incelenmiştir. Bu durum Şekil 5 ile gösterildiği gibi panelin belirli bir bölgesinde hücre yanmasına neden olmuştur. Hücrenin yanmasından sonra sun simülasyon ortamında test edildiğinde panelden hiçbir değer elde edilmediği gözlemlenmektedir.



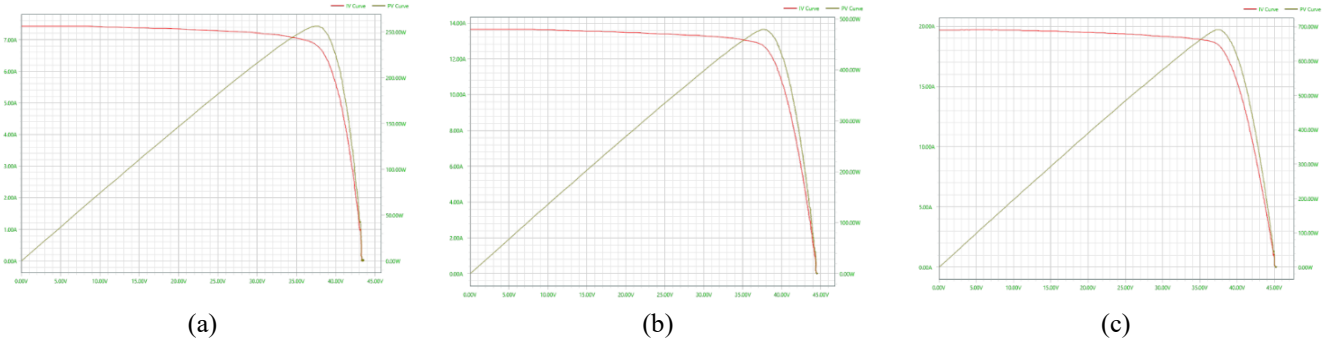
Şekil 5. Yanmış hücrelerden oluşan panel

Bu çalışmanın sonuçları, güneş panellerindeki çatlaklardan kaynaklanan aşırı hücre ısınmasının hücre yanmasına ve bu yanmanın panelin performansı üzerindeki olumsuz etkilerine yol açabileceğini göstermektedir. Bu bulgular, güneş paneli tasarımı ve kullanımıyla ilgili önlemlerin alınması ve güneş panellerinin uzun vadeli dayanıklılığının sağlanması için önemlidir.

3.3 Işık şiddeti

Bu aşamada ışık şiddetinin değişiminin paneller üzerindeki etkileri incelenmiştir. Işık değeri normal test koşullarında 1000W/m^2 'den daha düşük seviyelere ayarlanarak üç ayrı test gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde, ışık şiddetinin güneş panelinin verimliliği üzerindeki etkisi net bir şekilde gözlemlenmiştir.

İlk teste, panele 372.77W/m^2 ışık şiddetinde çalıştırılmıştır. İkinci teste, ışık şiddeti 681.1W/m^2 olarak ayarlanırken, üçüncü teste normal koşullarda olduğu gibi 1000W/m^2 ışık şiddetine yakın bir değer olan 996.81W/m^2 uygulanmıştır. Şekil 6 a, b ve c ile verilen test sonuçları ile panelin performansı karşılaştırılmıştır. Üç farklı ışığa için elde edilen değerler Tablo 2'de verilmektedir.



Şekil 6. Farklı ışık şiddetlerinde elde edilen panel güç değerleri (a) 372W/m², (b) 681 W/m², (c) 996.81W/m²

Tablo 2. Işık şiddeti testi verileri

	372.77W/m ² ışık şiddeti altında	681.1W/m ² ışık şiddeti altında	996.81W/m ² ışık şiddeti altında
I _{sc}	7.4241 A	13.6319 A	19.6738 A
V _{oc}	43.219 V	44.339 V	44.992 V
I _m	6.7992 A	12.6847 A	18.4574 A
V _m	37.168 V	37.301 V	37 V
F.F.	%78.76	%78.28	%77.15
I _{load}	7.4132 A	13.6188 A	19.6455 A
V _{load}	10 V	10 V	10 V
Güneş Işını	372.77 W/m ²	681.21 W/m ²	996.81 W/m ²
Ortam Sıcaklığı	26.6 °C	26.6 °C	26.7 °C
Panel Sıcaklığı	24.1 °C	24.1 °C	24.1 °C
Panel Çıkış Gücü	252.708 Watt	473.151 Watt	682.922 Watt

Tablo 2 ile verilen veriler incelendiğinde, 372.77 W/m² ışık şiddeti altında, panelin çıkış gücü 252.708 Watt olarak ölçülmüştür. Aynı panel, 681.21 W/m² ışık şiddeti altında test edildiğinde ise çıkış gücü 473.151 Watt olarak ölçülmüştür. Son olarak, normal koşullarda beklenen ortalama 1000 W/m² ışık şiddeti altında gerçekleştirilen testlerde panelin çıkış gücü 682.922 Watt olarak ölçülmüştür.

Bu değerlere göre, ışık şiddeti düştüğünde, güneş panelinin veriminde azalma olduğu gözlemlenmiştir. Daha düşük ışık seviyelerinde, panelin elektrik üretme kapasitesi de düşmüştür. Bu bulgu, güneş enerjisi sistemlerinin güneş ışığına maruz kalma derecesinin verimliliği üzerinde önemli bir faktör olduğunu doğrulamaktadır. Bu nedenle, güneş panellerinin optimum performansını sağlamak için güneş ışığına maruz kalma koşulları dikkatle gözlemlenmelidir.

3.4 Hücre ve panel seçimi

Bu aşamada, 85 Wattlık monokristal ve polikristal güneş panelleri, ve şarj ünitesi aynı ortamda, aynı anda güneş ışığına maruz bırakılarak bir aküyü doldurmak için kullanılmıştır. Monokristal ve polikristal panellerin performansını karşılaştırmak için güneş ışığının en yoğun olduğu saatler olarak seçilen saat 12.00 ile 14.00 tercih edilmiştir. Her iki panelin de aküyü doldurma süreci sırasında ürettikleri enerji ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 3 ile gösterilmektedir. Her iki panel için akünün ilk şarj kontrol değeri Şekil 7'de verildiği gibi 11V olarak ölçülmüştür.

Tablo 3. Panel seçimi verileri

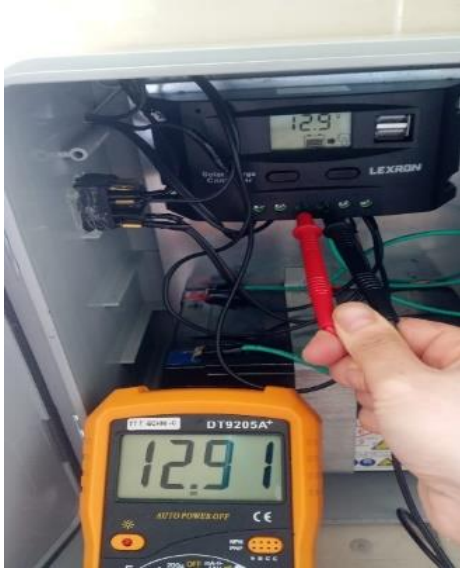
	Monokristal Panel	Polikristal Panel
Aküyü doldurma sürecinde ortalama gerilim değeri	11.0 V	11.0V
12.00 ile 14.00 saatleri arasında akünün dolması için gereken süre	2 SAAT	2 SAAT
Bu süre sonunda akünün ulaştığı gerilim	12.9 V	12.3



Şekil 7. Monokristal ve polikristal panel akülerinin ilk ölçüm değeri

Deney sonuçlarına göre, monokristal panelin polikristal panele kıyasla daha yüksek bir verimlilik sağladığı gözlemlenmiştir. Özellikle saat 12.00 ile 14.00 arasında, monokristal panel kullanıldığında aküde 12,91V'luk bir gerilim değerine ulaşılırken (Şekil 8a), polikristal panel kullanıldığında 12,3V'luk bir gerilim değerine ulaşabilmektedir (Şekil 8b).

Bu çalışma ile güneş enerjisi sistemleri için hücre ve panel seçiminde monokristal hücrelerin tercih edilmesinin önemini vurgulamaktadır. Monokristal panellerin daha yüksek verimlilik sağladığı ve dolayısıyla daha etkili güneş enerjisi üretimine olanak tanıdığı sonucuna ulaşılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 8. 12.00- 14.00 arasındaki saatlerde akü gerilim değeri (a) Monokristal panel, (b) Polikristal panel

3.5 Panelin yaşlanması ve kirlenmesi

Panelin yaşlanması ve kirlenmesi ile ilgili yapılan çalışmada, etiket değeri 680 W değerindeki bir güneş panelinin üzeri Şekil 9a'da gösterildiği gibi tamamen toz ile kaplanmış durumda test edilmiştir. Daha sonra panel Şekil 9b gösterildiği gibi temizlenerek aynı test işlemi tekrar sun simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, her iki durum için kısa devre akım (I_{sc}), açık devre gerilim (V_{oc}), maksimum akım, gerilim ve güç değerleri (I_m , V_m , P_m), yük akım ve gerilim değerleri (I_{load} , V_{load}) değerleri ölçülmüştür. Elde edilen veriler Tablo 4 ile verilmektedir.

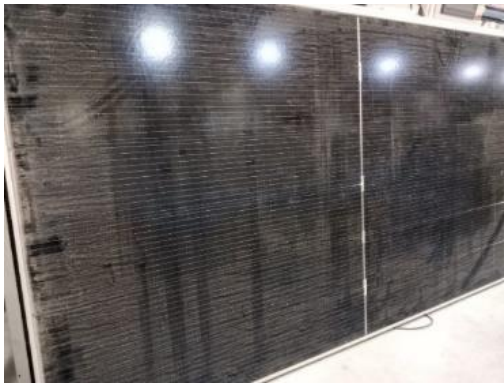
Deney sonuçları incelendiğinde, aynı ışımaya değerinde kısa devre akımının kirliliği ve tozlu olan panelde daha düşük olduğu ve verimin daha düşük olduğu net bir şekilde gözlemlenmiştir. Ayrıca kirliliği ve tozlu olan panel için Şekil 10a ile verilen I-V grafiği ve temiz panel için Şekil 10b ile verilen I-V grafik karşılaştırıldığında, maksimum akım değerinin temiz panelde daha yüksek olduğu görülmektedir.

Panelin toz ve kir ile kaplanması, güneş panelinin yüzeyindeki ışık emilimini azaltabilir ve dolayısıyla elektrik

üretim verimliliğini düşürebilmektedir. Temizlenmiş panelin test sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, kirlenmiş panelin veriminde belirgin bir düşüş olduğu görülmüştür.

Tablo 4. Kirliliği ve temiz panel verilerinin karşılaştırılması

	Kirliliği ve tozlu panel	Temizlenmiş panel
Date	2024-07-08	2024-07-08
Time	16:21:52	16:40:19
I_{sc}	18.2698A	19.4402 A
V_{oc}	43.291V	43.448 V
P_m	618.654W	653.049 W
I_m	17.1974A	18.1651 A
V_m	35.974V	35.951 V
F.F.	% 78.22	%77.32
Eff	% 19.88	%20.98
I_{load}	18.1868A	19.3026 A
V_{load}	10V	10 V
Sun	997.09W/m ²	997.79W/m ²



(a)



(b)

Şekil 9. (a) Tozlu ve kirliliği panel, (b) Temizlenmiş panel



(a)



(b)

Şekil. 10. Sun simülatör kullanılarak elde edilen I-V grafikleri (a) Tozlu ve kirli panel, (b) Temizlenmiş panel

4 Sonuçlar

Bu çalışma güneş panellerinin performansını etkileyen gölgelenme, ışık şiddeti, yaşlanma ve kirlilik faktörleri kapsamlı bir şekilde incelemiş ve bu faktörlerin paneller üzerindeki negatif etkilerini açıkça ortaya koymuştur. Özellikle gölgelenme, hücre sıcaklığı, ışık şiddeti, hücre seçimi ve panelin yaşlanması gibi unsurların, güneş panellerinin verimliliğinde ciddi düşümlere neden olabileceği gözlemlenmiştir.

Gölgelenme, panelin akım, gerilim, doluluk faktörü ve verimlilik gibi kritik performans göstergelerinde kayda değer düşümlere yol açmıştır. Bu durum, güneş enerjisi sistemlerinin tasarımında gölgelenmenin en aza indirilmesinin ne kadar önemli olduğunu vurgulamaktadır. Hücre sıcaklığı testi ise, hücre çatlaklarının panel performansını nasıl olumsuz etkileyebileceğini ve bu tür hasarların önlenmesi gerektiğini göstermiştir.

Işık şiddetinin panel performansı incelendiğinde, daha yüksek ışık şiddeti seviyelerinde panel verimliliğinin arttığını ortaya koyulmuş, aynı zamanda farklı ışık seviyelerinde optimum performansın sağlanması için dikkatli bir tasarımın önemi vurgulanmıştır. Monokristal hücrelerin polikristal hücrelere göre daha verimli olduğu belirlenmiş ve bu da hücre seçiminin güneş enerjisi sistemlerinde kritik bir karar olduğunu göstermiştir.

Son olarak, panelin yaşlanması ve kirlenmesiyle ilgili bulgular, güneş panellerinin düzenli bakım ve temizliğinin performansı korumak ve optimize etmek için vazgeçilmez olduğunu kanıtlamıştır. Panelin kirliliği ve tozlu yüzeyleri, ışık emilimini azaltarak elektrik üretim verimliliğini düşürmektedir.

Bu bulgular, güneş enerjisi sistemlerinin tasarımı, bakımı ve optimizasyonunda dikkate alınması gereken önemli stratejik kararları desteklemektedir. Bu çalışma, güneş enerjisi teknolojisinin daha verimli, güvenilir ve dayanıklı hale getirilmesine yönelik araştırma ve geliştirme çalışmalarına önemli bir katkı sunmaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %5

Kaynaklar

- [1] S. Çamcı, K. Ulgen, Süperkapasitörlerin güneş enerjili insansız hava araçlarında kullanımına yönelik Matlab/Simulink modeli. DEÜ, FMD, 24(70), 221-232, 2022. <http://doi.org/10.21205/deufmd.2022247021>
- [2] S. Emikonel, A. Bilhan, Analysis of Turkey's solar energy potential in different regions. OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 5(Special Issue), 170-184, 2022. <http://doi.org/10.47495/okufbe.d.1034175>
- [3] B. M. Hamed, & M. S. El-Moghany, Fuzzy controller design using FPGA for sun tracking in solar array system. International Journal of Intelligent Systems and Applications, 4 (1), 46-52, 2012. <http://doi.org/10.5815/ijisa.2012.01.06>
- [4] M. Öztürk, R. Kayabşı, Güneş enerjisinin İç Anadolu bölgesinde kullanılabilirliği ve system analizi. NÖHÜ Müh. Bilim. Derg., 12(4), 1351-1359, 2023. <http://doi.org/10.28948/ngumuh.1310627>
- [5] F. M. Guangul, & G. T. Chala, Solar energy as renewable energy source: SWOT analysis. 2019 4th MEC International Conference on Big Data and Smart City (ICBDSC), s. 1-5, Muscat, Oman, 2019. <http://doi.org/10.1109/ICBDSC.2019.8645580>
- [6] C. Haydaroglu, B. Gümüş, Dicle Üniversitesi güneş enerjisi santralının PVsyst ile simülasyonu ve performans parametrelerinin değerlendirilmesi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 7(3), 491-500, 2016.
- [7] Ş. Sağlam, Şebeke bağlantılı fotovoltaik aydınlatma sisteminin bulanık mantık ile kontrolü. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, s.10-15, İstanbul, 2006.

- [8] N. Yılkıran, D. İsaogulları, Photovoltaic system design and analysis: the case of Sivas Technology development zone. *Journal of Science and Technology*, 3(1), 14-20, 2024. <https://doi.org/10.69560/cujast.1464421>
- [9] J. Nelson, *The physics of solar cells*. Imperial College Press, s. 1004, New York, 2020.
- [10] C. Lungenschmied, G. Dennler, H. Neugebauer, S. N. Sariciftci, M. Glatthaar, T. Meyer, & A. Meyer, Flexible, long-lived, large-area, organic solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91 (5), 379-384, 2007. <http://doi.10.1016/j.solmat.2006.10.013>
- [11] Y. Liang, D. Feng, Y. Wu, S. T. Tsai, G. Li, C. Ray, & L. Yu, Highly efficient solar cell polymers developed via fine-tuning of structural and electronic properties. *Journal of the American Chemical Society*, 131 (22), 7792-7799, 2009. <http://doi.10.1021/ja901545q>
- [12] W. Hong, Y. Xu, G. Lu, C. Li, & G. Shi, Transparent graphene/PEDOT-PSS composite films as counter electrodes of dye-sensitized solar cells. *Electrochemistry Communications*, 10 (10), 1555-1558, 2008. <http://doi.10.1016/j.elecom.2008.08.007>
- [13] A. Taşcıoğlu, Monokristal ve polikristal güneş panellerinin Bursa koşullarındaki güç performansı üzerine bir araştırma. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bursa, 2015.
- [14] L. Jiang, S. Cui, P. Sun, Y. Wang & C. Yang, Comparison of Monocrystalline and Polycrystalline Solar Modules. 2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), 12-14 Haziran, 2020. <http://doi.10.1109/ITOEC49072.2020.9141722>
- [15] A. Pavlovic, C. Fragassa, M. Bertoldi & V. Mikhnych, Thermal Behavior of Monocrystalline Silicon Solar Cells: A Numerical and Experimental Investigation on the Module Encapsulation Materials. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, Vol. 7(3), ss. 1847-1855, Temmuz, 2021. <http://doi.10.22055/JA-CM.20.21.37852.3101>.
- [16] G. Albate, & M., Tucci, Polycrystalline silicon thin-film solar cells: Present status and future potential. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 60 (1), 343-352, 2000. <http://doi.10.1016/j.solmat.2013.05.043>
- [17] M. O. Karaağa., H. Oğul, F. Bulut, Evaluation of monocrystalline and polycrystalline photovoltaic panels in Sinop province. *Turkish Doğa ve Fen Dergisi*, 10(1), 176-181, 2021. <https://doi.org/10.46810/tdfd.855488>
- [18] C. Haydaroğlu, B. Gümüş, Investigation of the effect of short term environmental contamination on energy production in photovoltaic panels: Dicle University solar power plant example. *Applied Solar Energy*, 53(1), 31-34, 2017. <http://doi.10.3103/S0003701X17010066>
- [19] S. Duman, M. Alçı, Yarım ve tam fotovoltaiik hücreleri ile tasarlanan güneş enerjisi panellerinin toplam verimliliğini etkileyen parametrelerin incelenmesi. *NÖHÜ Müh. Bilim. Derg.* 11(3), 592-600, 2022. <http://doi.10.28948/ngmuh.1073976>





DFT analysis of salicylideneaniline derivatives as corrosion inhibitors for mild steel

Yumuşak çelik için korozyon inhibitörleri olarak salisilidenanilin türevlerinin DFT analizi

Mehmet Erman Mert^{1,*} , Başak Doğru Mert² 

¹ Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Advanced Technology Research and Application Center, 01250, Adana, Türkiye

² Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Department of Energy Systems Engineering, 01250, Adana, Türkiye

Abstract

Schiff bases are important in corrosion inhibition due to their ability to form stable complexes with metal ions and create protective layers on metal surfaces, thereby extending the lifespan of structural materials in various industrial applications. In this study the Salicylideneaniline and its derivatives were analyzed as corrosion inhibitor versus mild steel corrosion via DFT analysis. The eight molecules were chosen; salicylideneaniline, 2-(benzylideneamino)phenol, 4-(benzylideneamino)phenol, 2-phenyldiazenylphenol, 2-Phenylazo-4-methylphenol, 3-methyl-2-phenyldiazenyl phenol, 2-[(2-methylphenyl)diazenyl]phenol, 4-phenyldiazenylbenzene-1,3-diol, for this purpose. The Gaussian 03 program and the 6-311++G (d, p) basis set was used. Electronic properties such as the energy of the highest occupied molecular orbital (E_{HOMO}), energy of the lowest unoccupied molecular orbital (E_{LUMO}), energy gap (ΔE) between LUMO and HOMO, dipole moment, and charges on the backbone atoms, ESP were determined.

Keywords: Corrosion, Green inhibitör, DFT, ESP

1 Introduction

Salicylideneaniline is an important Schiff base widely utilized in numerous scientific and industrial applications due to its chemical properties [1, 2]. It is prominently utilized in the development of liquid crystal materials, which are essential in modern display technologies, including televisions, computer monitors, and smartphones [3-5]. Additionally, salicylideneaniline serves as a key component in the synthesis of coordination compounds, where it acts as a bidentate ligand, forming stable complexes with various metal ions [6-8]. These complexes are studied for their potential catalytic, magnetic, and luminescent properties, which play an important role in advancing catalysis, materials science, and sensor technology. Furthermore, the study of salicylideneaniline derivatives aids in understanding the structure-property relationships in Schiff bases, providing insights that are valuable in the design of new functional materials [9-12]. Salicylideneaniline and its derivatives have garnered significant attention in academic research as corrosion inhibitors for metals, particularly in

Öz

Schiff bazları, metal iyonları ile stabil kompleksler oluşturma yetenekleri ve metal yüzeylerinde koruyucu tabakalar oluşturma kapasiteleri sayesinde, çeşitli endüstriyel uygulamalarda yapısal malzemelerin ömrünü uzatmada korozyon inhibisyonunda önemlidirler. Bu çalışmada, Salisilidenanilin ve türevleri, DFT analizi yoluyla yumuşak çelik korozyon inhibitörü olarak incelendi. Bu amaçla salisilidenanilin, (2-(benzylideneamino)fenol, 4-(benzylideneamino)fenol, 2-fenildiazanilfenol, 2-fenilazo-4-metilfenol, 3-metil-2-fenildiazanilfenol, 2-[(2-metilfenil)diazenil]fenol, 4-fenildiazanilbenzen-1,3-diol) sekiz molekül seçildi. Gaussian 03 programı ve 6-311++G(d,p) temel seti kullanıldı. En yüksek dolu moleküler orbital enerjisi (E_{HOMO}), en düşük dolu olmayan moleküler orbital enerjisi (E_{LUMO}), LUMO ve HOMO arasındaki enerji farkı (ΔE), dipol moment ve atomları üzerindeki yükler gibi elektronik özellikler ve ESP belirlendi.

Anahtar kelimeler: Korozyon, Yeşil inhibitör, DFT, ESP

acidic environments [13, 14]. These compounds possess a structurally advantageous configuration that facilitates strong adsorption onto metal surfaces, crucial for forming protective layers against corrosion. The imine group in salicylideneaniline plays an important role in its effectiveness as a corrosion inhibitor, primarily due to its polarity and coordination capabilities. This functional group, characterized by a carbon-nitrogen double bond, imparts a polar nature to the molecule, enabling it to interact strongly with metal surfaces and metal ions in solution. The nitrogen atom in the imine group possesses a lone pair of electrons that can coordinate with metal ions, facilitating the formation of coordinate bonds. This interaction enhances the adsorption of salicylideneaniline onto metal surfaces, where it forms a stable protective layer. By covering active sites on the metal, this layer impedes corrosive agents from reaching and deteriorating the metal surface. Furthermore, the adsorption of salicylideneaniline alters the electrochemical properties of the metal surface, contributing to a reduction in the overall corrosion rate. This mechanism underscores the

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: memert@atu.edu.tr (M. E. Mert)

Geliş / Received: 28.06.2024 Kabul / Accepted: 05.09.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1506838

compound's ability to effectively mitigate corrosion through both physical and chemical interactions, making it a valuable agent in various industrial applications where metal protection is important [1, 15]. Additionally, the presence of phenolic hydroxyl groups enables hydrogen bonding interactions with metal atoms, further stabilizing the protective film [16-20]. The aromatic rings in the molecular structure contribute π -electron interactions, enhancing the inhibitor's ability to adhere to the metal surface effectively [6, 21-24]. Ongoing research into salicylideneaniline derivatives focuses on exploring various chemical modifications and their effects on corrosion inhibition efficiency, with the goal of enhancing their performance in industrial applications like metal coatings and corrosion-resistant materials [13, 14, 24]. Thus, salicylideneaniline represents an important class of compounds in the ongoing quest for effective and environmentally friendly corrosion control strategies.

Investigating the corrosion inhibition potential of compounds such as Salicylideneaniline and its derivatives (2-(benzylideneamino)phenol, 4-(benzylideneamino)phenol, 2-phenyldiazenylphenol, 2-Phenylazo-4-methylphenol, 3-methyl-2-phenyldiazenylphenol, 2-[(2-methylphenyl)diazenyl]phenol, 4-phenyldiazenylbenzene-1,3-diol) using Density Functional Theory (DFT) analysis holds significant academic importance. These compounds, known as Schiff bases, vary structurally and are recognized for their ability to form protective layers on metal surfaces, thereby mitigating corrosion processes, particularly in acidic environments where metal degradation is prevalent. The diversity in their structural configurations influences their adsorption behavior on metal surfaces, a critical aspect elucidated by DFT analysis. This theoretical approach provides detailed insights into molecular interactions at the atomic level, predicting adsorption energies, charge transfer phenomena, and electronic properties relevant to corrosion inhibition mechanisms. Through theoretical calculations, researchers can determine the most efficient Schiff bases, which in turn can direct the synthesis and development of corrosion inhibitors customized for certain industrial uses. Industries reliant on mild steel infrastructure benefit from prolonged asset lifespan, reduced maintenance costs, and minimized environmental impact associated with corrosion-related failures. Enhancing corrosion inhibition chemistry also helps with sustainability initiatives by encouraging resource efficiency and minimizing material waste. This scholarly endeavor not only broadens the theoretical framework in surface chemistry and materials science, but it also encourages creativity in the creation of new inhibitors that function better and are more environmentally friendly.

2 Materials and methods

The calculations of the molecules were achieved with the Gaussian 03W. We operated the program for Salicylideneaniline and its some derivatives (2-(benzylideneamino)phenol, 4-(benzylideneamino)phenol, 2-phenyldiazenylphenol, 2-Phenylazo-4-methylphenol, 3-methyl-2-phenyldiazenylphenol, 2-[(2-methylphenyl)diazenyl]phenol, 4-phenyldiazenylbenzene-1,3-diol). For

the optimized molecules the energy calculations were carried out at 6-311++G (d, p) basis set. The energy of highest occupied molecular orbital (E_{HOMO}), energy of the lowest unoccupied molecular orbital (E_{LUMO}), energy gap (ΔE) between LUMO and HOMO and Mulliken charges on the backbone atoms for molecules were determined. The obtained energy gap values were compared with the literature data. The optimized molecular structures and HOMO, LUMO surfaces were visualized using Gauss View.

3 Results and discussion

Density Functional Theory (DFT) with the B3LYP functional and 6-311++G(d,p) basis set is important for accurately predicting how Schiff bases like salicylideneaniline and its derivatives inhibit corrosion. This method balances computational efficiency with precision, providing insights into electronic structures and interactions at metal surfaces [25-28]. DFT provides guidance in the design of efficient corrosion inhibitors for industrial applications by simulating adsorption energies and charge transfers [29-32]. The obtained results (Mulliken charges of atoms in au unit; electrostatic potential ESP, HOMO and LUMO surfaces) were presented in Figures 1-8.

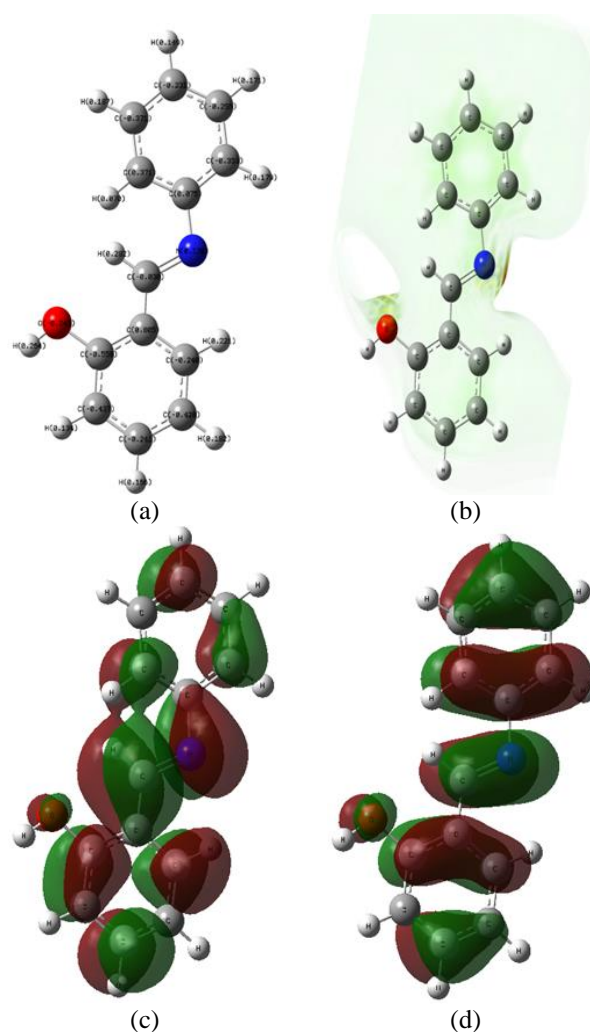


Figure 1. The Mulliken charges (a), ESP (b), LUMO (c) and HOMO (d) of salicylideneaniline

In Figure 1, Salicylideneaniline exhibits a varied distribution of Mulliken charges across its molecular structure, which influences its potential as a corrosion inhibitor. The C atoms range from slightly negative to positive charges (-0.371 to 0.805), indicating different degrees of electron density and potential interactions with metal surfaces. This diversity suggests that salicylideneaniline may form complex coordination bonds or adsorption layers on metal surfaces, depending on the specific carbon atom involved. The N atom shows a small positive charge (0.120), suggesting a region capable of accepting electrons, potentially contributing to stabilizing metal ions on the surface. Meanwhile, oxygen (O) exhibits a negative charge (-0.241), enhancing its ability to interact with metal cations or form hydrogen bonds with the surrounding environment, aiding in corrosion inhibition. The H atoms generally display positive charges, indicating their role in stabilizing the molecule through intramolecular interactions or participating in hydrogen bonding with water molecules or acidic species in the corrosion environment. The distribution of Mulliken charges and ESP in salicylideneaniline underscores its potential as a corrosion inhibitor, highlighting its complex molecular interactions that contribute to protective mechanisms against metal degradation in corrosive environments. In Figure 1, the widespread distribution of the HOMO and LUMO across the entire structure of salicylideneaniline is significant in the context of its potential as a corrosion inhibitor. This extensive distribution suggests that salicylideneaniline can effectively donate and accept electrons from metal surfaces, facilitating strong adsorption and the formation of stable protective layers. This wide-ranging contact capability improves the molecule's ability to connect with metal ions, stable metal surfaces, and effectively prevent corrosive processes in a variety of environmental circumstances by covering the full molecule [33-38].

In Figure 2, the Mulliken charges for 2-(benzylamino) phenol reveal a distribution of electron density across its molecular structure, which is important for understanding its potential as a corrosion inhibitor. The C atoms exhibit a range of charges from positive to negative values, indicating different degrees of electron donation and acceptance capabilities throughout the molecule. This variability suggests diverse interactions with metal surfaces, where certain carbon atoms may facilitate strong coordination or adsorption processes, contributing to corrosion inhibition mechanisms. The N atom shows a positive charge (0.187841), suggesting it can donate electrons to stabilize metal ions or participate in hydrogen bonding interactions, potentially enhancing the molecule's effectiveness in corrosive environments. The O atom exhibits a negative charge (-0.250701), which could facilitate interactions with metal cations or water molecules, further contributing to corrosion inhibition. The H atoms generally display positive charges, indicating their role in stabilizing the molecule's structure through intramolecular interactions or forming hydrogen bonds with the surrounding environment [39-41].

The similarity in the shape of the HOMO and LUMO between 2-(benzylamino)phenol and salicylideneaniline,

despite their differing values, indicates comparable electronic structure characteristics relevant to their corrosion inhibition potential. Both molecules likely exhibit HOMO and LUMO distributions that are delocalized over their aromatic ring systems and functional groups. This extensive distribution suggests that both can effectively interact with metal surfaces through electron donation and acceptance, crucial for forming stable adsorption layers and inhibiting corrosion processes. The specific differences in HOMO and LUMO energies and their distribution may influence their exact mechanism of interaction with metal ions and the surrounding environment in corrosion inhibition [42, 43].

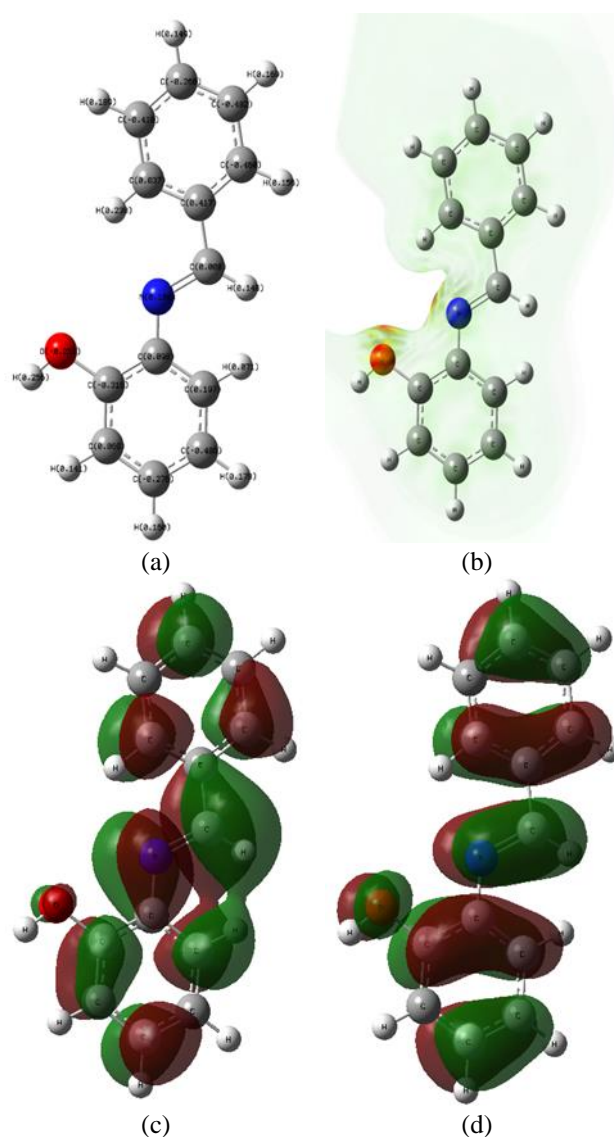


Figure 2. The Mulliken charges (a), ESP (b), LUMO (c) and HOMO (d) of 2-(benzylideneamino)phenol

In Figure 3, the Mulliken charges for 4-benzylideneaminophenol illustrate a distribution of electron density across its molecular structure, which is critical for understanding its potential as a corrosion inhibitor. The C atoms exhibit varying charges from positive to negative values, indicating different degrees of electron donation and

acceptance capabilities throughout the molecule. This variability suggests diverse interactions with metal surfaces, where certain carbon atoms may facilitate strong coordination or adsorption processes, contributing to corrosion inhibition mechanisms. The N atom has positive charge (0.172624), suggesting it can donate electrons to stabilize metal ions or participate in hydrogen bonding interactions, potentially enhancing the molecule's effectiveness in corrosive environments. The O atom exhibits a negative charge (-0.321571), which could facilitate interactions with metal cations or water molecules, further contributing to corrosion inhibition. The ESP and frontier orbitals shapes correlate this claim.

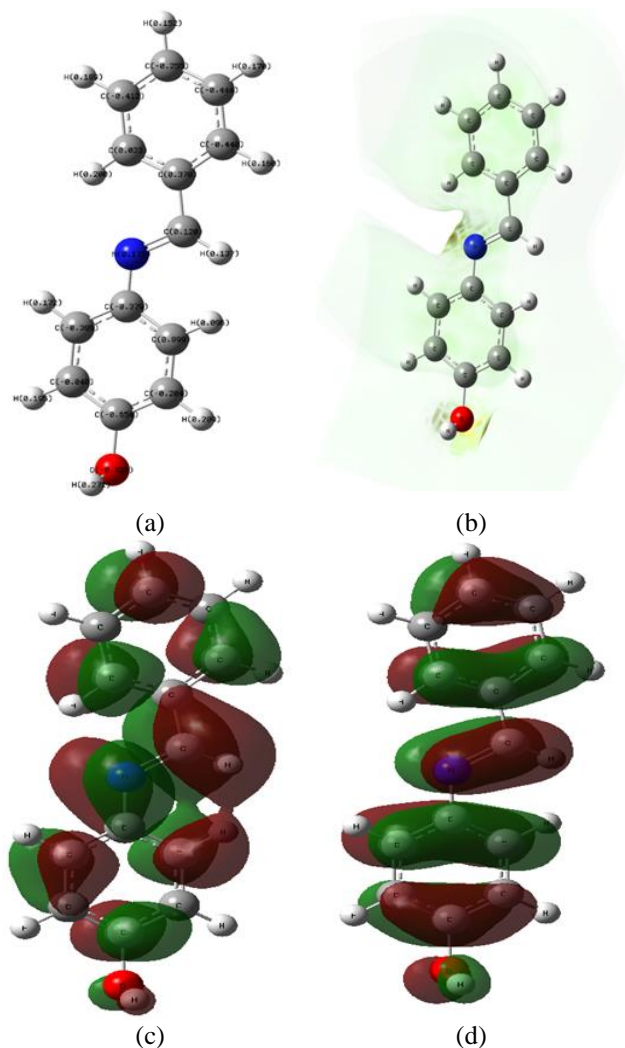


Figure 3. The Mulliken charges (a), ESP (b), LUMO (c) and HOMO (d) of 4-(benzylideneamino)phenol

In [Figure 4](#), the Mulliken charges for 2-phenyldiazenylphenol reveal a nuanced distribution of electron density across its molecular structure, which is important for assessing its potential as a corrosion inhibitor. The C atoms exhibit a range of charges, spanning from negative to positive values, indicating varying degrees of electron donation and acceptance capabilities throughout the molecule. This variability suggests diverse interactions with

metal surfaces, where specific carbon atoms may facilitate robust coordination or adsorption processes, thereby contributing significantly to corrosion inhibition mechanisms. The N atoms display mixed charges: one nitrogen atom showing a slight negative charge (-0.021678) and the other exhibiting a positive charge (0.116187). These contrasting charges suggest potential sites for electron donation and participation in hydrogen bonding interactions, crucial for stabilizing metal ions on the surface and enhancing corrosion inhibition effectiveness [\[44-46\]](#).

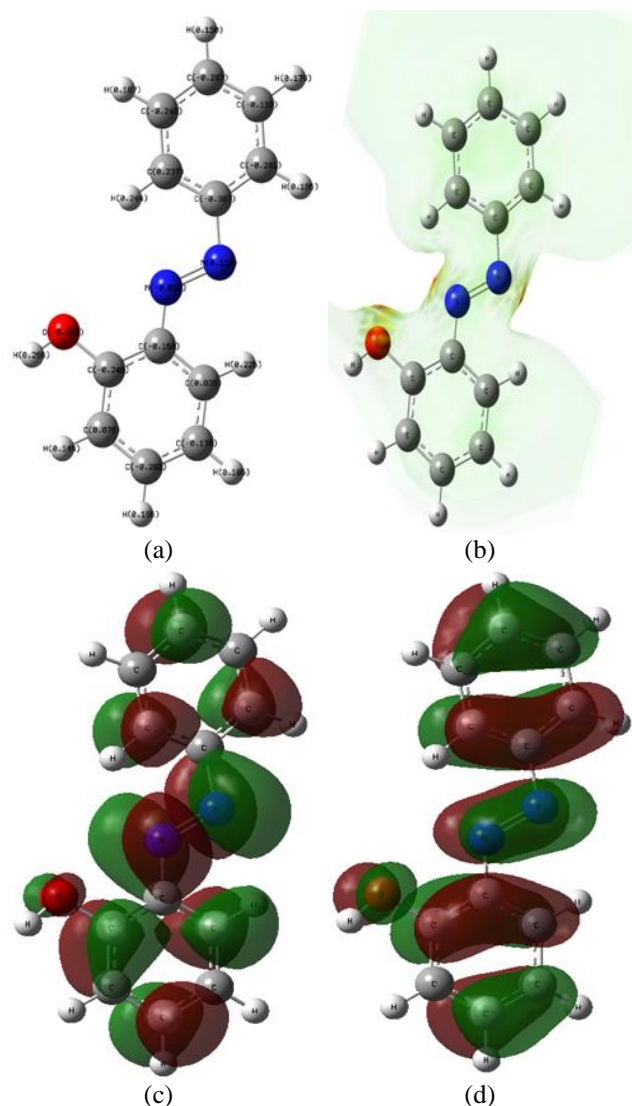


Figure 4. The Mulliken charges (a), ESP (b), LUMO (c) and HOMO (d) of 2-phenyldiazenylphenol

Additionally, in [Figure 4](#), the O atom has negative charge (-0.235083), likely promoting interactions with metal cations or water molecules, further bolstering the molecule's corrosion inhibition properties. The H atoms generally present positive charges, indicative of their role in stabilizing the molecule through intra-molecular interactions or forming hydrogen bonds with the surrounding environment [\[47, 48\]](#).

In [Figure 5](#), the Mulliken charges for 2-Phenylazo-4-methylphenol exhibit a varied distribution of electron density

across its molecular structure, which is critical for evaluating its effectiveness as a corrosion inhibitor. The C atoms display a range of charges from negative to positive, indicating differing electron donation and acceptance capabilities. This variation suggests diverse interactions with metal surfaces, with specific carbon atoms potentially facilitating strong coordination or adsorption processes that contribute to the corrosion inhibition mechanism. The N atoms have different charges, with one nitrogen atom slightly negative (-0.015939) and the other slightly positive (0.126024). These charges indicate potential sites for electron donation and acceptance, important for forming stable bonds with metal surfaces and participating in hydrogen bonding interactions that enhance the molecule's inhibition effectiveness. The O atom carries a negative charge (-0.238246), suggesting a high potential for interactions with metal cations or water molecules, which is essential for the corrosion inhibition process.

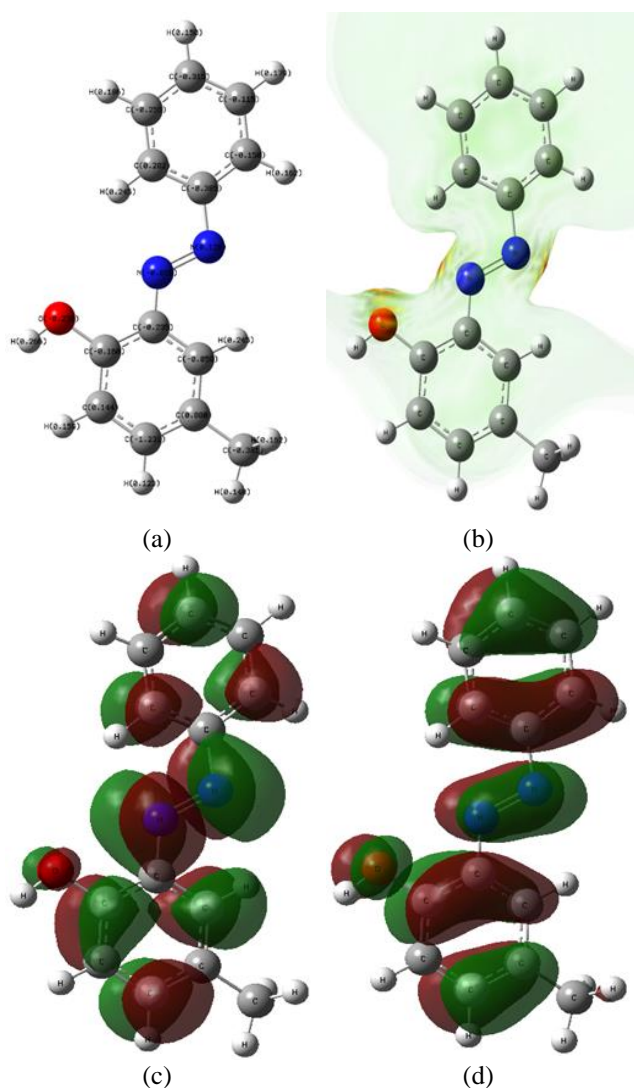


Figure 5. The Mulliken charges (a), ESP (b), LUMO (c) and HOMO (d) of 2-Phenylazo-4-methylphenol

H atoms generally display positive charges, indicating their role in stabilizing the molecule through intramolecular

interactions and forming hydrogen bonds with the surrounding environment. The effect of charge distribution was correlated in ESP. The localized LUMO and HOMO proved the high potential inhibitor behavior [46, 49, 50].

In Figure 6, the Mulliken charges for 3-methyl-2-phenyldiazenylphenol reveal a complex distribution of electron density across its molecular structure, which is essential for understanding its potential as a corrosion inhibitor. The C atoms exhibit a wide range of charges from highly negative (-0.516012) to slightly positive (0.278585), indicating various degrees of electron donation and acceptance throughout the molecule. This variability suggests that different carbon atoms may engage in diverse interactions with metal surfaces, enhancing the molecule's ability to inhibit corrosion through adsorption and coordination processes.

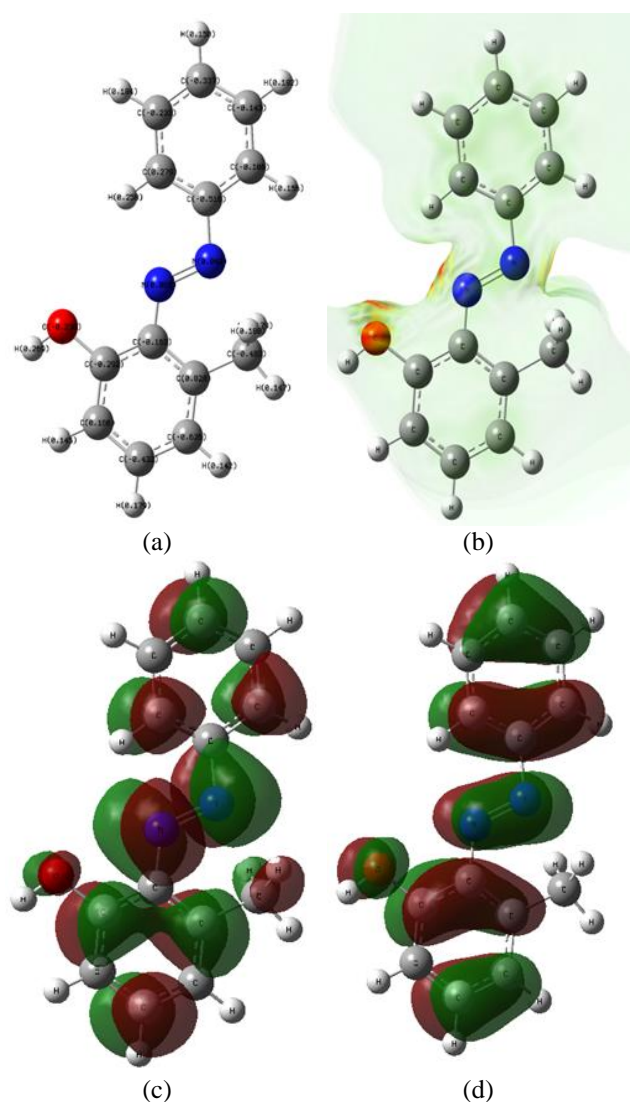


Figure 6. The Mulliken charges (a), ESP (b), LUMO (c) and HOMO (d) of 3-methyl-2-phenyldiazenylphenol

The N atoms display slightly positive charges (0.065483 and 0.049167), suggesting potential sites for electron donation and hydrogen bonding interactions. These

interactions are important for stabilizing metal ions on the surface and improving the overall effectiveness of the corrosion inhibition. The O atom has a negative charge (-0.229808), indicating a strong potential for interactions with metal cations or water molecules, which plays a significant role in the corrosion inhibition process. In ESP, the distribution of charges had a correlating effect. Localized LUMO and HOMO demonstrate the behavior of a strong potential inhibitor [51]. In 3-methyl-2-phenyldiazenylphenol, the localization of the LUMO is notable not only across the entire molecule but also particularly on the methyl group. This distribution is slightly different from other molecules where the LUMO is more uniformly spread across the molecule. The presence of the LUMO on the methyl group suggests that this group could play a significant role in the molecule's electronic interactions with metal surfaces. From a corrosion inhibition perspective, the LUMO distribution enhances the molecule's ability to accept electrons from the metal surface, thus contributing to the adsorption process.

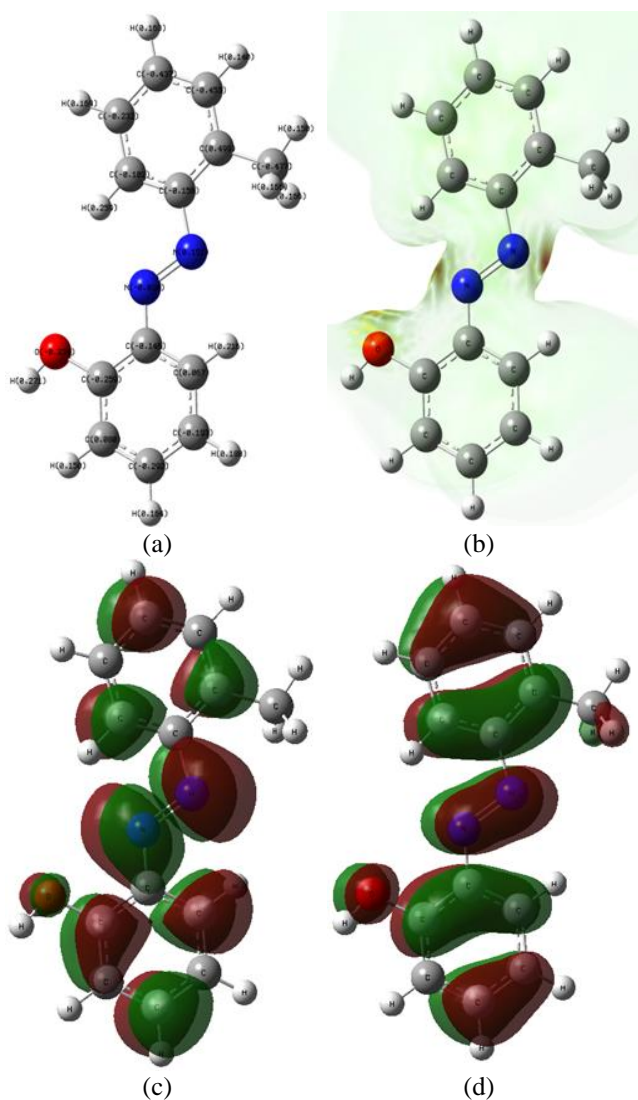


Figure 7. The Mulliken charges (a), ESP (b), LUMO (c) and HOMO (d) of 2-[(2-methylphenyl)diazenyl]phenol

The methyl group, typically considered inert in many chemical reactions, becomes an active site due to this LUMO localization, potentially increasing the overall efficiency of the molecule as a corrosion inhibitor. The electronic interactions facilitated by the LUMO on the methyl group may lead to a more stable and protective layer formation on the metal surface, thereby improving the inhibition performance against corrosive agents [52].

In Figure 7, for 2-[(2-methylphenyl)diazenyl]phenol, the Mulliken charges show a complex distribution of electron density, which is need for understanding its effectiveness as a corrosion inhibitor. The C atoms exhibit a range of charges from highly negative (-0.477234) to positive (0.499092), indicating various electron-donating and electron-accepting capabilities. This distribution suggests potential diverse interactions with metal surfaces, enhancing the adsorption and coordination processes that are vital for corrosion inhibition. The N atoms have charges of -0.018258 and 0.151003, indicating potential sites for electron donation and acceptance, which are essential for forming stable bonds with metal surfaces and participating in hydrogen bonding interactions that improve corrosion inhibition. The oxygen atom (O) has a negative charge (-0.234416), highlighting its role in interacting with metal cations or water molecules, which is a critical aspect of the inhibition process. In Figure 7, the HOMO is localized on the methyl group, which is unusual as methyl groups are typically considered less reactive in many chemical contexts. The methyl group may actively contribute to electron donation to the metal surface, increasing the molecule's adsorption efficiency, according to the existence of the HOMO on this group. Stronger interactions with the metal surface resulting from this localization may make it easier for a stable protective layer to form, hence reducing corrosion [53].

In Figure 8, for 4-phenyldiazenylbenzene-1,3-diol, the Mulliken charge distribution shows the C atoms exhibit a range of charges, with some being significantly negative (e.g., -0.583712) and others positive (e.g., 0.379117). This variation in charge indicates diverse electron-donating and electron-accepting abilities, which are essential for strong adsorption to metal surfaces and effective corrosion inhibition. The N atoms have relatively small charges (-0.013791 and 0.109692), suggesting their roles as minor sites for electron donation and acceptance. The O atoms, with charges of -0.233462 and -0.316361, are likely involved in hydrogen bonding and interactions with metal cations, which are critical for forming a protective barrier against corrosion [52, 54].

Furthermore, the absolute electronegativity (χ), absolute hardness (η) and softness ($\vartheta=1/\eta$) values were calculated [55-58];

$$A = -E_{LUMO} \quad (1)$$

$$I = -E_{HOMO} \quad (2)$$

$$\chi = \frac{I + A}{2} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{I - A}{2} \quad (4)$$

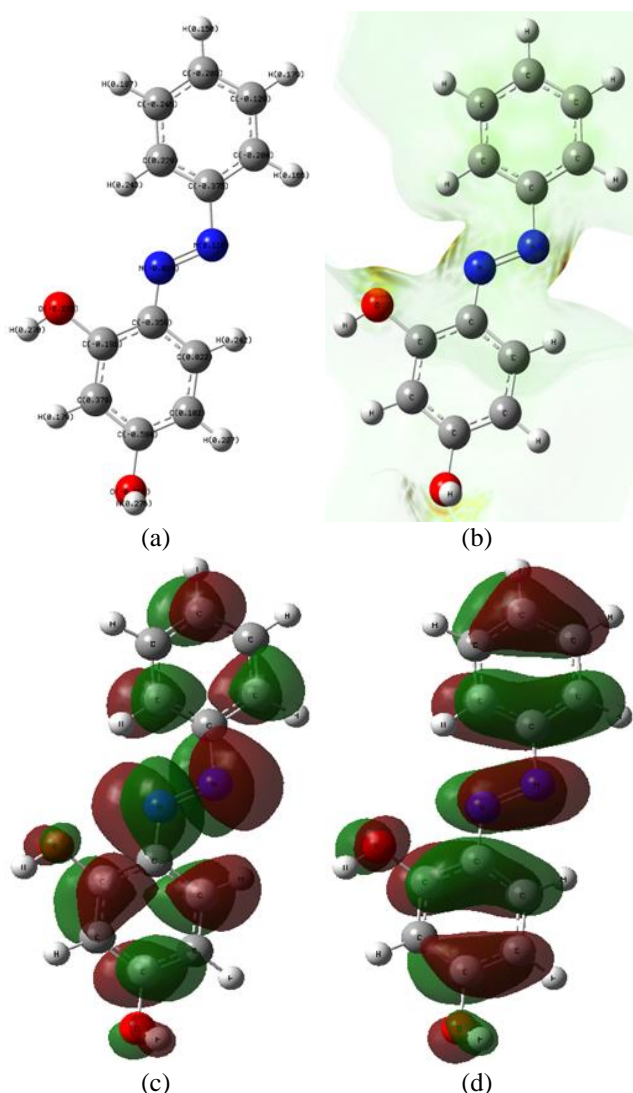


Figure 8. The Mulliken charges (a), ESP (b), LUMO (c) and HOMO (d) of 4-phenyldiazenylbenzene-1,3-diol

Salicylideneaniline and its derivatives—2-(benzylideneamino)phenol, 4-(benzylideneamino)phenol, 2-phenyldiazenylphenol, 2-phenylazo-4-methylphenol, 3-methyl-2-phenyldiazenylphenol, 2-[(2-methylphenyl) diazenyl]phenol, and 4-phenyldiazenylbenzene-1,3-diol demonstrate varied electronic properties that are significant for their application as corrosion inhibitors. The Mulliken charge analysis indicates substantial differences in electron distribution, which directly influences their interaction with metal surfaces. For instance, salicylideneaniline demonstrates a diverse range of charges, with some carbon atoms being positively charged and others negatively charged, suggesting its potential for both electron donation and acceptance. Conversely, derivatives such as 2-phenyldiazenylphenol show more pronounced negative charges on certain carbons, enhancing their electron-accepting capabilities. As seen from Table 1, quantum chemical parameters, including electronegativity (χ),

absolute hardness (η), softness (ϑ), and dipole moment (μ), provide further insights into the reactivity and interaction potential of these molecules. Salicylideneaniline has an electronegativity of 3.160 eV and an absolute hardness of 1.580 eV, indicative of its balanced electron affinity and resistance to deformation. In contrast, 2-phenyldiazenylphenol has a higher electronegativity (4.644 eV) and lower absolute hardness (1.455 eV), reflecting its stronger tendency to attract electrons and greater flexibility in electronic configuration. The softness values (ϑ) suggest that these molecules possess the adaptability required for effective metal surface interaction, with 2-[(2-methylphenyl) diazenyl]phenol having the highest softness (0.702 eV⁻¹), indicating its superior capability to distribute electron density upon interaction. Additionally, the dipole moments (μ) ranging from 1.5768 D to 3.5540 D across these molecules denote their varying degrees of polarity, which affects their solubility and adsorption behavior on metal surfaces. Salicylideneaniline, with a dipole moment of 3.5540 D, demonstrates the highest polarity, potentially enhancing its surface interaction and inhibitory effectiveness. To calculate the number of electrons transferred (ΔN) from the inhibitor molecules to iron (Fe), the equation considers the absolute electronegativity (χ) and absolute hardness (η) of both iron and the inhibitor. Iron's absolute electronegativity (χ_{Fe}) is 7.87 eV, with an absolute hardness (η_{Fe}) of 0, reflecting its relatively inert nature [56]. Inhibitor molecules such as salicylideneaniline derivatives exhibit varying electronegativities and hardness values, influencing their electron-donating or accepting capacities when interacting with iron surfaces. For Salicylideneaniline, χ and η were determined as 4.187 eV and 1.580 eV, so the $\Delta N \approx 4.29$, indicating a moderate electron transfer capability from Salicylideneaniline to iron. For 2-(benzylideneamino)phenol $\Delta N \approx 4.68$; for 4-(benzylideneamino)phenol $\Delta N \approx 4.39$; for 2-phenyldiazenylphenol $\Delta N \approx 3.57$; for 2-phenylazo-4-methylphenol $\Delta N \approx 3.71$; for 3-methyl-2-phenyldiazenylphenol $\Delta N \approx 5.61$; for 2-[(2-methylphenyl) diazenyl]phenol $\Delta N \approx 5.08$ and for 4-phenyldiazenylbenzene-1,3-diol $\Delta N \approx 3.39$. As the structural complexity and substituent groups vary among the molecules analyzed, the ΔN values show distinct trends. For instance, molecules like 3-methyl-2-phenyldiazenylphenol and 2-[(2-methylphenyl) diazenyl]phenol exhibit higher ΔN values of approximately 5.61 and 5.08, respectively, suggesting a stronger electron transfer capability to iron due to the presence of methyl groups. Conversely, molecules with fewer or no methyl groups, such as 2-phenyldiazenylphenol with $\Delta N \approx 3.57$, demonstrate comparatively lower electron donation potential. The comparison of salicylideneaniline and derivatives versus literature is seen in Table 2 [59-63].

The comparison of the energy gap (ΔE) values among various inhibitors provides insight into their reactivity and effectiveness as corrosion inhibitors. In this study, several salicylideneaniline derivatives exhibited relatively low ΔE values, ranging from 2.850 eV for 2-[(2-methylphenyl) diazenyl]phenol to 3.160 eV for salicylideneaniline itself, indicating moderate reactivity.

These values are generally lower than those reported by Abdelsalam et al. [59], such as N-(furan-2-ylmethylene)-1H-1,2,4-triazol-3-amine (4.249 eV) and N-(thiophen-2-ylmethylene)-1H-1,2,4-triazol-3-amine (4.151 eV), suggesting that these compounds might exhibit lower reactivity as corrosion inhibitors. The compound 2-pyrrolidin-1-yl-1,3-thiazole-5-carboxylic acid, studied by Karazehir et al. [61], has a high ΔE value of 6.416 eV, indicating significantly lower reactivity and suggesting less effective corrosion inhibition. Similarly, Hamood et al. [60] reports an even higher ΔE for 7-mercapto-4-methylcoumarin at 6.637 eV, reinforcing its characterization as a less reactive

molecule. Conversely, compounds studied by Golafshani et al. [62], such as 3-O-caffeoylquinic acid (2.590 eV) and 4-O-caffeoylquinic acid (2.440 eV), display the lowest ΔE values, indicating higher reactivity and potential effectiveness as corrosion inhibitors. The ΔE values suggest a range of reactivity among these compounds, which may inform their suitability and efficiency as corrosion inhibitors under specific conditions [63]. The lower ΔE values typically correlate with better performance in inhibiting corrosion due to increased electronic interactions with metal surfaces.

Table 1. The quantum chemical parameters (electronegativity (χ), absolute hardness (η), softness (ϑ) and dipole moment= μ) of molecules

Molecule	E_{LUMO} / eV	E_{HOMO} / eV	ΔE / eV	χ / eV	η / eV	ϑ / eV ⁻¹	μ / D
Salicylideneaniline	-5.767	-2.607	3.160	4.187	1.580	0.633	3.5540
2-(benzylideneamino)phenol	-5.695	-2.595	3.101	4.145	1.550	0.645	1.5768
4-(benzylideneamino)phenol	-5.810	-2.680	3.130	4.245	1.565	0.639	2.0577
2-phenyldiazenylphenol	-6.099	-3.189	2.909	4.644	1.455	0.687	2.4971
2-Phenylazo-4-methylphenol	-6.028	-3.144	2.884	4.586	1.442	0.693	2.6696
3-methyl-2-phenyldiazenylphenol	-6.089	-3.020	3.068	4.555	1.534	0.652	2.2138
2-[(2-methylphenyl)diazenyl]phenol	-6.020	-3.170	2.850	4.595	1.425	0.702	2.4406
4-phenyldiazenylbenzene-1,3-diol	-6.096	-3.200	2.896	4.648	1.448	0.691	2.3149

Table 2. The comparison of ΔE for several corrosion inhibitors

Molecule	ΔE / eV	References
1-((1H-1,2,4-triazol-3-ylimino)methyl)naphthalen-2-ol	3.673	
N-(furan-2-ylmethylene)-1H-1,2,4-triazol-3-amine	4.249	[59]
N-(thiophen-2-ylmethylene)-1H-1,2,4-triazol-3-amine	4.151	
7-mercapto-4-methylcoumarin	6.637	[60]
2-pyrrolidin-1-yl-1,3-thiazole-5-carboxylic acid	6.416	[61]
3-O-Caffeoylquinic acid	2.590	
4-O-Caffeoylquinic acid	2.440	[62]
5-O-Caffeoylquinic acid	2.610	
(E)-4-(((4-propylphenyl) imino)methyl)phenol	4.141	
(E)-4-((o-tolylimino)methyl)phenol	4.194	[63]
Salicylideneaniline	3.160	In this study
2-(benzylideneamino)phenol	3.101	In this study
4-(benzylideneamino)phenol	3.130	In this study
2-phenyldiazenylphenol	2.909	In this study
2-Phenylazo-4-methylphenol	2.884	In this study
3-methyl-2-phenyldiazenylphenol	3.068	In this study
2-[(2-methylphenyl)diazenyl]phenol	2.850	In this study
4-phenyldiazenylbenzene-1,3-diol	2.896	In this study

4 Conclusion

This study focuses on salicylideneaniline and its derivatives as potential corrosion inhibitor candidates. The Mulliken charge analysis revealed significant variations in electron distribution across the molecules, which influence their ability to donate or accept electrons when interacting with metal surfaces. Quantum chemical parameters such as electronegativity, absolute hardness, softness, and dipole moment provided further insights into the reactivity, adaptability, and interaction potential of these inhibitors. Salicylideneaniline exhibited a balanced electron affinity and notable polarity, while derivatives like 2-phenyldiazenylphenol demonstrated stronger electron-attracting capabilities and greater electronic flexibility. These findings emphasize the importance of tailoring molecular properties to enhance corrosion inhibition performance, suggesting that the strategic modification of electronic characteristics can lead to the development of more effective and targeted corrosion inhibitors.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 14%

References

- [1] M. Benmabrouk, S. Seridi, Y. Aimene and S. Almi, Synthesis, spectroscopic characterization, DFT, and molecular docking analysis of some Salicylideneaniline schiff base derivatives as potential antioxidant compounds. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 1-27, 2023. <https://doi.org/10.1080/10406638.2023.2276252>.
- [2] Z. Moosavi-Tekyeh and N. Dastani, Intramolecular hydrogen bonding in N-salicylideneaniline: FT-IR spectrum and quantum chemical calculations. *Journal of Molecular Structure*, 1102, 314-322, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2015.09.001>.
- [3] S. Shahab, L. Filippovich, M. Aharodnikova, H. A. Almodarresiyeh, F. H. Hajikolae, R. Kumar and M. Mashayekhi, Photochromic properties of the N-Salicylideneaniline in Polyvinyl Butyral matrix: Experimental and theoretical investigations. *Journal of Molecular Structure*, 1134, 530-537, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2016.12.038>.
- [4] J-W Hu, H-Y Tsai, S-K Fang, C-W Chang, L-C Wang and K-Y Chen, Conformationally locked salicylideneaniline derivatives with strong ES IPT fluorescence. *Dyes and Pigments*, 145, 493-504, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2017.06.037>.
- [5] E. D. Akpan, A. K. Singh, H. Lgaz, T. W. Quadri, S. K. Shukla, B. Mangla, A. Dwivedi, O. Dagdag, Sheetal, E. E. Inyang and E. E. Ebenso, Coordination compounds as corrosion inhibitors of metals: A review. *Coordination Chemistry Reviews*, 499, 215503, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2023.215503>.
- [6] Sheetal, A. K. Singh, S. Thakur, B. Pani and M. Singh, Heterocyclic compounds as corrosion inhibitors for iron alloys in various industrial processes: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 130, 141-177, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.10.005>.
- [7] X. Li, J. He, B. Xie, Y. He, C. Lai, W. Wang, J Zeng, B. Yao, W. Zhao and T. Long, 1,4-Phenylenediamine-based Schiff bases as eco-friendly and efficient corrosion inhibitors for mild steel in HCl medium: Experimental and theoretical approaches. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 955, 118052, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2024.118052>.
- [8] A. Fellah, Y. Harek, I. Ichchou, L. Larabi, H. Rouabhi, R. Bourzami and A. Ammari, Experimental and DFT studies of a novel salicylhydrazone derivative as a steel corrosion inhibitor. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 685, 133150, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.133150>.
- [9] N. Karakuş, Determination of inhibition mechanism of mono-azo Naphthylamine dyes: A computational corrosion study. *Turkish Computational and Theoretical Chemistry*, 1, 35-44, 2017.
- [10] K. Sayin, N. Kurtoglu, M. Kose, D. Karakas and M Kurtoglu, Computational and experimental studies of 2-[(E)-hydrazinylidenemethyl]-6-methoxy-4-[(E)-phenyldiazenyl]phenol and its tautomers. *Journal of Molecular Structure*, 1119, 413-422, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2016.04.097>.
- [11] D. Daoud, T. Douadi, H. Hamani, S. Chafaa and M. Al-Noaimi, Corrosion inhibition of mild steel by two new S-heterocyclic compounds in 1 M HCl: Experimental and computational study. *Corrosion Science*, 94, 21-37, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.01.025>.
- [12] J. D. Margerum and J. A. Sous, Spectroscopic studies of substituted Benzalaniline. *Applied Spectroscopy*, 19, 91-97, 1965.
- [13] O. O. Emmanuel, O. B. Samuel, O. F. Kolawole, A. D. Dada, A. E. Oluwafisayo, E. B. Chibuzo and I. Nureni, Experimental and theoretical study on the corrosion inhibitive potentials of schiff base of Aniline and Salicylaldehyde on mild steel in 0.5M HCl. *Advanced Journal of Chemistry-Section B*, 2, 197-208, 2020. <https://doi.org/10.22034/ajcb.2020.113664>.
- [14] T. Umasankareswari and T. Jeyaraj, Salicylideneaniline as inhibitor for the corrosion of mild steel in 1.0 N hydrochloric acid. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 4, 3414-3419, 2012.
- [15] S. M. Merdas, Synthesis, characterization and DFT studies of new azo-schiff base and evaluation as corrosion inhibitor. *Annals of the Romanian Society for Cell Biology*, 25, 910-928, 2021. <http://www.annalsofrscb.ro/index.php/journal/article/view/2519>.
- [16] C. Verma, D. S. Chauhan, R. Aslam, P. Banerjee, J. Aslam, T. W. Quadri, M. A. Quraishi, D. K. Verma, A. AlFantazia and T. Rasheed, Principles and theories of green chemistry for corrosion science and engineering:

- design and application. *Green Chemistry*, 26, 4270-4357, 2024. <https://doi.org/10.1039/d3gc05207a>.
- [17] R. Sehrawat, P. Vashishth, H. Bairagi, S. K. Shukla, H. Kumar, G. Ji and B. Mangla, Coordination bonding and corrosion inhibition characteristics of chalcone compounds for metals: An inclusive review based on experimental as well as theoretical perspectives. *Coordination Chemistry Reviews*, 514, 215820, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.215820>.
- [18] R. Sehrawat, R. Pundeer, S. Yadav, P. Vashishth, H. Bairagi, S. K. Shukla and B. Mangla, Insights of newly synthesized novel pyrazole compounds for mild steel corrosion inhibition in an acidic environment by experimental and computational calculations. *Journal of Molecular Structure* 2024;1316. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.139017>.
- [19] K. Mortadi, A. El Amri, M. Ouakki, R. Hsissou, A. Jebli, A. Lebkiri, Z. Safi, N. Wazzan, A. Berisha, M. Cherkaoui, E. Mahdi Hbaiz and H. Cherkaoui, Electrochemical and theoretical studies on a bioactive Juniperus oxycedrus essential oil as a potential and ecofriendly corrosion inhibitor for mild steel in 1.0 M HCl environment. *Inorganic Chemistry Communications*, 162, 112196, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112196>.
- [20] Y. Li, Z. Guo, H. Zhi, Y. Qiang, X. Liu, Y. Zhang, Y. Wan, T. Xiang and X. Li, Experimental and computational exploration of the biodegradable platanus acerifolia leaf extract against mild steel corrosion in hydrochloric acid. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 7830-7842, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.148>.
- [21] D. I. Udunwa, O. D. Onukwuli, M. C. Menkiti, S. C. Nwanonyeni, C. B. Ezekannagha and C. O. Aniagor, Experimental, computational, and theoretical studies on the corrosion inhibition potential of green Gongronema latifolium extract as corrosion inhibitor for aluminum alloy in HCl solutions. *Journal of Molecular Structure*, 1302, 137508, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.137508>.
- [22] Sheetal, A. K. Singh, V. C. Anadebe, M. Singh, N. Arshad, R. C. Barik, M. A. U. R. Qureshi, T. W. Quadri, E. D. Akpan, L. O. Olasunkanmi, S. K. Shukla, J. Tuteja, S. Thakur, B. Pani and E. E. Ebenso, Coordination chemistry of chalcones and derivatives and their use as corrosion inhibitors: A comprehensive review. *Coordination Chemistry Reviews*, 517, 215985, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.215985>.
- [23] L. Ma, H. Yang, D. Zhang and W. Wu, Inhibition for atmospheric corrosion of mild steel by lysine salts with graphene oxide interlayer in situ modulation. *Corrosion Science*, 226, 111639, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111639>.
- [24] O. Berkesi, T. Körtvélyesi, C. Hetényi, T. Németh, and I. Pálkó, Hydrogen bonding interactions of benzylidene type Schiff bases studied by vibrational spectroscopic and computational methods. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 5, 2009-2014, 2003. <https://doi.org/10.1039/b301107k>.
- [25] S. Li, C. Li and F. Wang, Computational experiments of metal corrosion studies: A review. *Materials Today Chemistry*, 37, 101986, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2024.101986>.
- [26] B. Li, L. Guo, X. Bai, S. Zhang, Z. Zhang, H. Zhou, H. Dong and Y. Li, Experimental and theoretical investigation of 1-Hexyl-3-methylimidazolium iodide as a corrosion inhibitor for mild steel in HCl environment. *International Journal of Electrochemical Science*, 19, 100580, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100580>.
- [27] H. Lachhab, N. Benzbiria, A. Titi, S. Echihi, M. E. Belghiti, Y. Karzazi, A. Zarrouk, R. Touzani, C. Jama and F. Bentiss, Detailed experimental performance of two new pyrimidine-pyrazole derivatives as corrosion inhibitors for mild steel in HCl media combined with DFT/MDs simulations of bond breaking upon adsorption. *Colloids Surface Physicochemistry Engineering Aspects*, 680, 132649, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.132649>.
- [28] R. Khanna, M. Dudi, B. Mangla, V. Kalia, A. Sihmar, H. Tanwar and H. Dahiya, Assessment of pyrazole Schiff base's corrosion inhibition effectiveness incorporating oxadiazole moiety on mild steel in 1 M HCl: A holistic theoretical and experimental analysis. *Journal of Molecular Structure*, 1317, 139066, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.139066>.
- [29] W. M. I. W. M. Kamaruzzaman, M. S. Shaifudin, N. A. M. Nasir, M. A. Badruddin, N. Yusof, A. Adnan, N. A. Aziz, W. M. N. W. Nik, J. Haque, M. Murmu, P. Banerjee and M. S. Mohd Ghazali, Experimental, DFT and molecular dynamic simulation of *Andrographis paniculata* as corrosion inhibitor for mild steel in artificial seawater. *Materials Chemistry and Physics*, 312, 128642, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128642>.
- [30] Z. N. Jiang, J. M. Duan, X. Q. Zeng, S. Y. Peng, Y. R. Li, W. Xiong, C. F. Dong and G. A. Zhang, Dramatic improvement in corrosion inhibition effect of carboxymethyl cellulose by modified with levodopa: Experimental study and first-principles calculations. *Corrosion Science*, 232, 112037, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2024.112037>.
- [31] M. Errami, A. El-Asri, S. Fdil, S. Ourouadi, O. Iddelmouiden, A. Jmiai, L. Bazzi, A. Hadfi and R. A. Akbour, Green Ostrich fat waste extracts as a novel potential inhibitor to sustainable corrosion of steel in acidic environments: Electrochemical and DFT evaluation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 689, 133684, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.133684>.
- [32] A. H. Alamri, K. Rasheeda, S. J. Kamal, M. Aljohani, T. A. Aljohani, I. Baig, V. D. P. Alva, N. P. Swathi, I. B. Onyeachu and S. Samshuddin, Pyrimidine derivatives as efficient anticorrosive agents for acid corrosion of mild steel: Electrochemical and computational validation. *Arabian Journal of*

- Chemistry, 17, 105752, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.105752>.
- [33] S. Ahmadi and A. Khormali, Optimization of the corrosion inhibition performance of 2-mercaptobenzothiazole for carbon steel in HCl media using response surface methodology. *Fuel*, 357, 129783, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129783>.
- [34] D. I. Udunwa, O. D. Onukwuli, M. C. Menkiti, V. C. Anadebe and M. A. Chidiebere, 1-Butyl-3-methylimidazolium methane sulfonate ionic liquid corrosion inhibitor for mild steel alloy: Experimental, optimization and theoretical studies. *Heliyon*, 9, e18353, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18353>.
- [35] Z. N. Jiang, J. M. Duan, X. Q. Zeng, Y. R. Li, C. F. Dong and G. A. Zhang, Unveiling the adsorption and inhibition mechanism of thiazazole derivatives for mild steel corrosion in hydrochloric acid based on experimental approaches and first-principles calculations. *Corrosion Science*, 224, 111492, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111492>.
- [36] D. I. Udunwa, O. D. Onukwuli and V. C. Anadebe, Synthesis and evaluation of 1-butyl-3-methylimidazolium chloride based ionic liquid for acid corrosion inhibition of aluminum alloy: Empirical, DFT/MD-simulation and RSM modeling. *Journal of Molecular Liquids*, 364, 120019, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120019>.
- [37] D. Kumar, V. M. K. V. Jain and B. Rai, Integrating experiments, DFT and characterization for comprehensive corrosion inhibition studies – A case for cinnamaldehyde as an excellent green inhibitor for steels in acidic media. *Corrosion Science*, 208, 110623, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110623>.
- [38] A. Saady, Z. Rais, F. Benhiba, R. Salim, K. Ismaili Alaoui, N. Arrousse, F. Elhajjaji, M. Taleb, K. Jarmoni, Y. Kandri Rodi, I. Warad and A. Zarrouk, Chemical, electrochemical, quantum, and surface analysis evaluation on the inhibition performance of novel imidazo[4,5-b] pyridine derivatives against mild steel corrosion. *Corrosion Science*, 189, 109621, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109621>.
- [39] V. C. Anadebe, P. C. Nnaji, O. D. Onukwuli, N. A. Okafor, F. E. Abeng, V. I. Chukwuike, C. C. Okoye, I. I. Udoh, M. A. Chidiebere, L. Guo and R. C. Barik, Multidimensional insight into the corrosion inhibition of salbutamol drug molecule on mild steel in oilfield acidizing fluid: Experimental and computer aided modeling approach. *Journal of Molecular Liquids*, 349, 118482, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.118482>.
- [40] D-Y. Wang, B-L. Nie, H-J. Li, W-W. Zhang, and Y-C. Wu, Anticorrosion performance of grape seed proanthocyanidins extract and Tween-80 for mild steel in hydrochloric acid medium. *Journal of Molecular Liquids*, 331, 115799, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115799>.
- [41] K. V. Thomas, K. J. Thomas, P. V. Rapheal, A. S. Sabu, K. Ragi and R. Johnson, Tinospora cordifolia extract as an environmentally benign green corrosion inhibitor in acid media: electrochemical, surface morphological, quantum chemical, and statistical investigations. *Materials Today Sustainability*, 13, 100076, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2021.100076>.
- [42] M. Murmu, S. K. Saha, N. C. Murmu and P. Banerjee, Effect of stereochemical conformation into the corrosion inhibitive behaviour of double azomethine based Schiff bases on mild steel surface in 1 mol L⁻¹ HCl medium: An experimental, density functional theory and molecular dynamics simulation study. *Corrosion Science*, 146, 134-151, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.10.002>.
- [43] E. Naseri, M. Hajisafari, A. Kosari, M. Talari, S. Hosseinpour and A. Davoodi, Inhibitive effect of Clopidogrel as a green corrosion inhibitor for mild steel; statistical modeling and quantum Monte Carlo simulation studies. *Journal of Molecular Liquids*, 269, 193-202, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.08.050>.
- [44] J. Zhang, W. Li, X. Zuo, Y. Chen, W. Luo, Y. Zhang, A. Fu, B. Tan and S. Zhang, Combining experiment and theory researches to insight into anti-corrosion nature of a novel thiazole derivatives. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 122, 190-200, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2021.04.035>.
- [45] S. N. Costa, F. W. Q. Almeida-Neto, O. S. Campos, T. S. Fonseca, M. C. de Mattos, V. N. Freire, P. Homem-de-Mello, E. S. Marinho, N. K. V. Monteiro, A. N. Correia and P. de Lima-Neto, Carbon steel corrosion inhibition in acid medium by imidazole-based molecules: Experimental and molecular modelling approaches. *Journal of Molecular Liquids*, 326, 115330, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115330>.
- [46] S. Aribu, S. J. Olusegun, G. L. S. Rodrigues, A. S. Ogunbadejo, B. Igaroola, A. T. Alo, W. R. Rocha, N. D. S. Mohallem and P. A. Olubambi, Experimental and theoretical investigation on corrosion inhibition of hexamethylenetetramine [HMT] for mild steel in acidic solution. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 112, 222-231, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2020.06.011>.
- [47] R. Farahati, A. Ghaffarinejad, S. M. Mousavi-Khoshdel, J. Rezaia, H. Behzadi and A. Shokravi, Synthesis and potential applications of some thiazoles as corrosion inhibitor of copper in 1 M HCl: Experimental and theoretical studies. *Progress in Organic Coatings*, 132, 417-28, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.04.005>.
- [48] Bhaskaran, P. D. Pancharatna, S. Lata and G. Singh, Imidazolium based ionic liquid as an efficient and green corrosion constraint for mild steel at acidic pH levels. *Journal of Molecular Liquids*, 278, 467-476, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.068>.
- [49] M. Oubaaqa, M. Ouakki, M. Rbaa, A. S. Abousalem, M. Maatallah, F. Benhiba, A. Jarid, M. Ebn Touhami

- and A. Zarrouk, Insight into the corrosion inhibition of new amino-acids as efficient inhibitors for mild steel in HCl solution: Experimental studies and theoretical calculations. *Journal of Molecular Liquids*, 334, 116520, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116520>.
- [50] A. Ehsani, M. G. Mahjani, M. Hosseini, R. Safari, R. Moshrefi and H. M. Shiri H, Evaluation of *Thymus vulgaris* plant extract as an eco-friendly corrosion inhibitor for stainless steel 304 in acidic solution by means of electrochemical impedance spectroscopy, electrochemical noise analysis and density functional theory. *Journal of Colloid and Interface Science*, 490, 444-451, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.11.048>.
- [51] J. Haque, V. Srivastava, C. Verma and M. A. Quraishi, Experimental and quantum chemical analysis of 2-amino-3-((4-(S)-2-amino-2-carboxyethyl)-1H-imidazol-2-yl)thio) propionic acid as new and green corrosion inhibitor for mild steel in 1 M hydrochloric acid solution. *Journal of Molecular Liquids*, 225, 848-855, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.11.011>.
- [52] A. Manivel, S. Ramkumar, J. J. Wu, A. M. Asiri and S. Anandan, Exploration of (S)-4,5,6,7-tetrahydrobenzo[d]thiazole-2,6-diamine as feasible corrosion inhibitor for mild steel in acidic media. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2, 463-470, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.01.018>.
- [53] P. Mourya, S. Banerjee and M. M. Singh, Corrosion inhibition of mild steel in acidic solution by *Tagetes erecta* (Marigold flower) extract as a green inhibitor. *Corrosion Science*, 85, 352-363, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.04.036>.
- [54] N. Soltani, N. Tavakkoli, M. K. Kashani, A. Mosavizadeh, E. E. Oguzie and M. R. Jalali, *Silybum marianum* extract as a natural source inhibitor for 304 stainless steel corrosion in 1.0 M HCl. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20, 3217-3227, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.12.002>.
- [55] H. M. Abd El-Lateef, A. R. Sayed and K. Shalabi, Studying the effect of two isomer forms thiazole and thiadiazine on the inhibition of acidic chloride-induced steel corrosion: Empirical and Computer simulation explorations. *Journal of Molecular Liquids*, 356, 119044, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119044>.
- [56] G. Gece and S. Bilgiç, A theoretical study of some hydroxamic acids as corrosion inhibitors for carbon steel. *Corrosion Science*, 52,3304-3308, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.06.005>.
- [57] D. Özkır, E. Bayol, A. Gürten, Y. Sürme and F. Kandemirli, Effect of hyamine on electrochemical behaviour of brass alloy in HNO₃ solution. *Chemical Papers*, 67, 202-12, 2013. <https://doi.org/doi:10.2478/s11696-012-0255-y>.
- [58] D. Özkır, K. Kayakırılmaz, E. Bayol, A. A. Gürten and F. Kandemirli, The inhibition effect of Azure A on mild steel in 1M HCl. A complete study: Adsorption, temperature, duration and quantum chemical aspects. *Corrosion Science* 56, 143-52, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.11.010>.
- [59] M. M. Abdelsalam, M. A. Bedair, A. M. Hassan, B. H. Heikal, A. Younis, Z. I. Elbially, M. A. Badawy, H. E.-D. Fawzy and S. A. Fareed, Green synthesis, electrochemical, and DFT studies on the corrosion inhibition of steel by some novel triazole Schiff base derivatives in hydrochloric acid solution. *Arabian Journal of Chemistry* 15, 103491, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103491>.
- [60] A. F. Hamood, H. M. Habeeb, B. A. Abdulhussein, A. M. Mustafa, F. F. Sayyid, M. M. Hanoon, T. S. Gaaz, L. A. Hameed and A. A. A. Alamiery, Weight loss, electrochemical measurements and DFT studies on corrosion inhibition by 7-mercapto-4-methylcoumarin. *Results in Engineering* 23, 102677, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102677>.
- [61] T. Karazehir, M. E. Mert and B. D. Mert, Corrosion prevention of mild steel in acidic medium by 2-Pyrrolidin-1-yl-1,3-thiazole-5-carboxylic acid: Theoretical and experimental approach. *Journal of Indian Chemical Society*, 99, 100642, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100642>.
- [62] M. G. Golafshani, H. Tavakoli, S. A. Hosseini and M. Akbari, MD and DFT computational simulations of Caffeoylquinic derivatives as a bio-corrosion inhibitor from quince extract with experimental investigation of corrosion protection on mild steel in 1M H₂SO₄. *Journal of Molecular Structure*, 1275, 134701, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.134701>.
- [63] E. E. Elemike, H. U. Nwankwo, D. C. Onwudiwe and E. C. Hosten, Synthesis, structures, spectral properties and DFT quantum chemical calculations of (E)-4-(((4-propylphenyl)imino)methyl)phenol and (E)-4-((2-tolylimino)methyl)phenol; their corrosion inhibition studies of mild steel in aqueous HCl. *Journal of Molecular Structure*, 1141, 12-22, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2017.03.071>.





AlSi10Mg alaşımının içyapı ve mekanik özellikleri üzerine sıcak presleme yönteminin etkisi

Effect of hot pressing method on the microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg alloy

Murat Beder^{1,*} 

¹ Gümüşhane Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 29100, Gümüşhane, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, sıcak presleme yöntemi kullanılarak üretilen ve farklı presleme sıcaklıklarında yoğunlaştırılan AlSi10Mg alaşımının mikroyapısı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi araştırılmıştır. Bu amaçla AlSi10Mg alaşımı numunelerine soğuk presleme (N0) ve 450 °C (N1), 500 °C (N2), 550 °C (N3) sıcaklarında sıcak presleme işlemi uygulanmıştır. Soğuk presleme yapılan N0 numunesindeki porozite miktarının N1, N2 ve N3 numunelerine göre yüksek olduğu ve artan sıcaklıkla yoğunluk değerlerinin arttığı, porozite miktarının ise azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, içyapı incelemelerinde artan sıcaklıkla birlikte içyapıdaki silisyum (Si) parçacıklarının giderek küreselleştiği ve yapı içerişe homojen bir şekilde dağıldığı gözlenmiştir. Buna göre, N0, N1, N2 ve N3 kodlu numunelerde en yüksek sertlik değerini yaklaşık %45'lik artış sergileyen N3 numunesi göstermiştir. Buna ilaveten N0, N1, N2 ve N3 numunelerinin yoğunluk değerleri sırasıyla 2.3523, 2.6165, 2.6191 ve 2.6287 gr/cm³ olarak belirlenmiştir. Çekme dayanım değerlerinde ise en yüksek çekme dayanım değeri N3 numunesinde 186 MPa olarak, en düşük çekme dayanım değeri ise N1 numunesinde 156 MPa olarak belirlenmiştir. Buna göre N3 numunesi N1 numunesine göre %20 oranında daha yüksek çekme dayanımı performansı sergilemiştir. Numunelere uygulanan bütün pres sıcakları için çekme ve darbe kırılma yüzeylerinin yarılma düzlemlerinden ve yırtılma sırtlarından oluştuğu belirlenmiştir. Ayrıca, çekme ve darbe deneylerinde elde edilen kırılma yüzeylerinde, artan presleme sıcaklığı ile sertliğin artmasından dolayı yarılma düzlemlerinin genişliklerinin arttığı tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Toz metalürjisi, Sıcak presleme, AlSi10Mg alaşımı, Mekanik özellikler

1 Giriş

Al-Si alaşımları, başta döküm teknikleri ile parça üretimi olmak üzere birçok endüstriyel alanda yaygın olarak uygulanmaktadır. Bunun nedeni, Silisyum (Si) ilavesinin erime sıcaklığını düşürmesi, düşük büzülme yol açması ve akışkanlığı artırmasıdır [1–5]. Al-Si alaşımlarındaki küçük miktarlardaki Mg'nin bu alaşımları ısı ileme tabi tutulabilir hale getirdiği ve mekanik özelliklerini geliştirdiği bilinmektedir [1–5]. Bu alaşım ailesinde AlSi10Mg, iyi

Abstract

In this study, the microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg alloy produced by hot pressing method and densified at different pressing temperatures were investigated. For this purpose, AlSi10Mg alloy samples were cold pressed (N0) and hot pressed at 450 °C (N1), 500 °C (N2), 550 °C (N3). It was determined that the amount of porosity in the cold pressed N0 sample was higher than the N1, N2 and N3 samples and the density values increased with increasing temperature and the amount of porosity decreased. In addition, it was observed that the silicon (Si) particles in the microstructure became increasingly spherical and homogeneously distributed in the structure with increasing temperature. Accordingly, the highest hardness value in N0, N1, N2 and N3 coded specimens was observed in N3 specimen with an increase of approximately 45 %. In addition, the density values of N0, N1, N2 and N3 samples were determined as 2.3523, 2.6165, 2.6191 and 2.6287 gr/cm³, respectively. In tensile strength values, the highest tensile strength value was determined as 186 MPa in sample N3 and the lowest tensile strength value was determined as 156 MPa in sample N1. Accordingly, N3 specimen exhibited 20 % higher tensile strength performance than N1 specimen. It was determined that the tensile and impact fracture surfaces consisted of cleavage planes and tear ridges for all press temperatures applied to the specimens. In addition, it was determined that the widths of the cleavage planes increased in the fracture surfaces obtained from tensile and impact tests due to the increase in hardness with increasing pressing temperature.

Keywords: Powder metallurgy, Hot pressing, AlSi10Mg alloys, Mechanical properties

korozyon direnci ve kaynaklanabilirliğe sahip hafif malzemeler gerektiren yüksek performanslı uygulamalar için idealdir [6–13].

Son yirmi yılda, dökme Al-Si alaşımlarının mikroyapısını iyileştirmek için çeşitli modifikasyon ve ısı işlem teknikleri geliştirilmiştir [14–17]. Araştırmaların ilk aşamasında Si parçacıklarının morfolojisini değiştirmek amaçlanmıştır. Genel olarak, kaba iğnemi Si parçacıklarını ince ve küresel parçacıklara dönüştürmek için kimyasal

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: muratbeder@gumushane.edu.tr (M. Beder)
Geliş / Received: 23.07.2024 Kabul / Accepted: 12.09.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1520826

modifikasyon ve ısı işlem yöntemleri kullanılmıştır [14–16]. Kimyasal modifikasyon yöntemleri, ötektik değiştiriciler olarak bilinen çok küçük miktarlarda sodyum, stronsiyum veya antimonun eklenmesini içerir [15, 16]. Sodyum iyi bir incelticidir ve geleneksel olarak ötektik parçacıkları küreselleştirmek için kullanılmaktadır [14–17]. Bununla birlikte, sodyumun faydaları yüksek sıcaklıklara tabi tutulduğunda hızla kaybolur ve değiştirici etki ortadan kalkar. Öte yandan stronsiyumun değiştirici etkisi yüksek sıcaklıklara tabi tutulduğunda kaybolmamakta ve kullanımı yaygınlaşmaktadır. Ancak stronsiyumun çözünmesi zordur ve çok uzun sürede gerçekleşmektedir [14–17].

Literatür çalışmalarında dökülmüş durumdaki AlSi10Mg alaşımının yoğunluk, sertlik değerleri ile çekme dayanımı değerleri sırasıyla 2.67 g/cm³, 80 BSD ve 200 MPa olarak bilinmektedir. Bu malzemelerin özelliklerini geliştirmek için katı hal işleminin (Toz Metalurjisi) kullanılması tavsiye edilmektedir [18–24]. Toz Metalurjisi (TM) süreci diğer üretim yollarına göre daha yaygın ve kullanışlıdır. Toz metalurjisi yönteminde kullanılan yoğunlaştırma yöntemleri soğuk ve sıcak presleme işlemleridir [18–24].

Soğuk presleme, serbest tozların istenen formda ve daha sonraki işlemler için yeterli mukavemette bir ürün halinde şekillendirilmesinde ilk adımdır. Çoğunlukla bir kalıpta tek yönlü sıkıştırma yapılarak soğuk presleme yoluyla gerçekleştirilir [25, 26]. Daha özel teknikler olarak ise enjeksiyonlu kalıplama ve patlayıcı sıkıştırma yöntemleri gelmektedir. Yoğunlaştırmanın ilk aşamasında parçacıklar yeniden düzenlenerek daha iyi bir presleme sağlanmaktadır. Basıncın artırılması daha iyi presleme ve gözenekliliğin azalmasını sağlar [25, 26]. Yüksek basınçta tek tek parçacıklar deforme olur ve parçacıklar arasında bir miktar soğuk kaynak meydana gelir. Bu kompakt malzemeye bir miktar dayanıklılık kazandırır. Kalıp çeperlerinde meydana gelen sürtünmeden dolayı kompaktın yoğunlaşması homojen değildir. Yağlayıcılar kullanılarak ve aynı anda üstten ve alttan yük uygulanarak sorun en aza indirilebilir [25, 26]. Kalıpların tasarımı çok önemlidir çünkü ham ürünün sıkıştırmadan sonra kalıptan çıkarılması gerektiği dikkate alınmalıdır. Bu, tek yönlü sıkıştırma ile elde edilebilecek geometriyi sınırlar [25, 26].

Bir diğer yöntem ise sıcak preslemedir (SP). Bu yöntemde eş zamanlı ısı ve basınç etkisi ile artık gözenekleri olmayan (tam yoğun kompaktlar) bir TM ürünü elde etmek mümkündür [25, 27, 28]. Bunu bir sinterleme işlemiyle de başarmak mümkündür bununla birlikte sinterleme işlemi için gerekli olan yüksek sıcaklığa dayanıklı kalıp, yüksek sıcaklık fırını ve inert atmosfer vb. ihtiyaçlar üretim maliyetini önemli oranda arttırmaktadır. Ayrıca boyutsal değişimler ve çarpılmalar da sinterleme işleminde dikkat edilmesi gereken hususlardır [25, 27, 28].

TM yöntemi ile üretimde ergime sıcaklığına göre daha düşük sıcaklıklarda malzeme üretimi gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde sıvı faz yöntemi olan döküm yönteminden farklı olarak Al ile takviyeler arasında istenmeyen reaksiyonların oluşma olasılığı oldukça azdır [18–24]. Bu üretim süreci özellikle kompozit üretiminde yüksek oranda takviyenin kullanımına imkan sağlamaktadır [18–24]. Buna

ek olarak Al matrisindeki Si gibi in-situ takviye parçacıklarının düzgün dağılımını da sağlar.

Literatür çalışmaları kapsamında, Hastie [28] SP AlSi10Mg parçalarının gözenekliliği üzerindeki etkisini araştırmıştır. Sonuçlar, 100 MPa basıncın, 500 °C sıcaklığın ve 2 saatlik bekleme süresinin, parçaların gözenekliliğini %3.26'dan %0.28'e düşürmede etkili olduğunu göstermiştir. Etki mekanizmaları, Xu tarafından yapılan çalışmada olduğu gibi sıcak presleme işlemi sırasında gözeneklerin küçülmesi, tane sınırı difüzyonu ve kütle transferine bağlanmıştır [29].

Schneller [30], 500 °C sıcaklık, 100 MPa basınç ve 2 saatlik süreyle yapılan SP işleminin, Si parçacıkları ve demir (Fe) açısından zengin iğne çökeltileri oluşturduğunu ve AlSi10Mg alaşımında iç gözenekliliği azalttığını ortaya çıkarmıştır. Azaltılmış gözenekler gerilim konsantrasyonunu en aza indirir ve oluşan çökeltiler çatlak ucunda çatlak sapmasını ve enerji dağılımını destekleyerek çatlak ilerlemesini engeller. Sonuç olarak yorulma mukavemetinde %14'ün üzerinde iyileşme elde edildiği belirlenmiştir.

Rosenthal [31] SP işlemini Schneller ile aynı parametreleri kullanarak uygulamıştır. Yüksek sıcaklığın Al matrisinin sürünmesine ve seçici lazer ergitme prosesinin neden olduğu yüksek artık gerilimini azalttığını belirlenmiştir. SP işleminden sonra artık gerilimde %50'nin üzerinde azalma belirlenmiştir. SP işlemi sonrasında elde edilen gözeneklilik azalması ya da artık gerilmelerin yok olması mikroyapıda ciddi değişikliklere yol açtığı bilinmektedir [31].

Guillermo [32], AlSi10Mg alaşımı üzerinde 300 °C'lik sıcaklıkta ve 300 MPa'lık basınçta 2 saat boyunca SP işlemi gerçekleştirmiştir. Deneyler sonucunda SP işleminin, Si ötektik ağma zarar verdiği ve mikron altı Si parçacıklarının meydana geldiği belirlenmiştir. Bu durumun çekme mukavemetinde yaklaşık %30'luk bir azalmaya neden olduğu belirlenmiştir. Hirata ve ark. [33], AlSi10Mg alaşımı üzerine uyguladığı 100 MPa basınç, 500 °C sıcaklık ve 2 saatlik süre ile SP işleminin, dendritik Si mikro yapısının granüler çökeltiye dönüşümüne yol açtığını gözlemlemiştir. Sonuç olarak çekme mukavemeti %50'nin üzerinde azalmıştır.

Kan ve ark. [34], 520°C'de, 100 MPa'da ve 2 saatlik bekleme süresinde SP işleminden sonra sertlikte %65'lik bir azalmanın meydana geldiğini belirlemiştir. Sertlikteki azalma, dispersiyon mukavemetinin azalmasına, katı çözelti sertleşmesine ve mikroyapısal değişimin neden olduğu dislokasyon miktarındaki azalmadan kaynaklanabileceği öne sürülmüştür.

Özay ve Karlıdağ [35], 2021 yılında yapmış oldukları AA-2024 ve B₄C kompozitlerin üretimi çalışmasında farklı presleme basınçlarında SP yöntemiyle gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmanın sonucunda artan presleme basıncı ile taneler arası gözeneklerin azaldığı ve buna bağlı olarak sertlik değerlerinin arttığı sonucuna ulaşmışlardır.

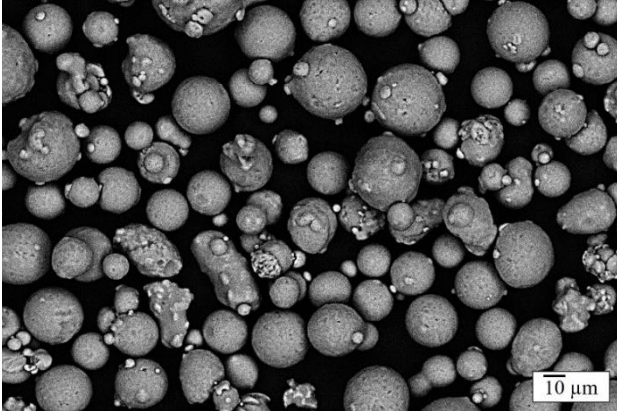
Bu çalışmada, literatürde yer alan çalışmalardan farklı olarak sıcak presleme işlemi ile üretilmiş AlSi10Mg tozlarının aynı presleme basınç değerinde farklı pres sıcaklıklarında preslenmesi sonucu mikroyapı ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması yapılarak literatüre kazandırılması amaçlanmıştır.

2 Materyal ve metot

Bu çalışma kapsamında kullanılan AlSi10Mg alaşımı (partikül boyutu 15-45 µm) Çin'den Jiangsu Vilory Advanced Materials Technology Co. Ltd. isimli firmasından temin edilmiştir. Tablo 1'de AlSi10Mg alaşımının kimyasal bileşimi, Şekil 1'de ise, AlSi10Mg alaşım tozlarına ait toz morfolojileri verilmiştir.

Tablo 1. AlSi10Mg alaşımının kimyasal bileşimi

Alaşım	Kimyasal bileşim (% ağırlık)				Teorik Yoğunluk (gr/cm ³)
	Al	Si	Mg	Diğer	
AlSi10Mg	88.8	9.77	0.385	1.045	2.64



Şekil 1. AlSi10Mg tozlarına ait başlangıç morfolojisini gösteren SEM fotoğrafı

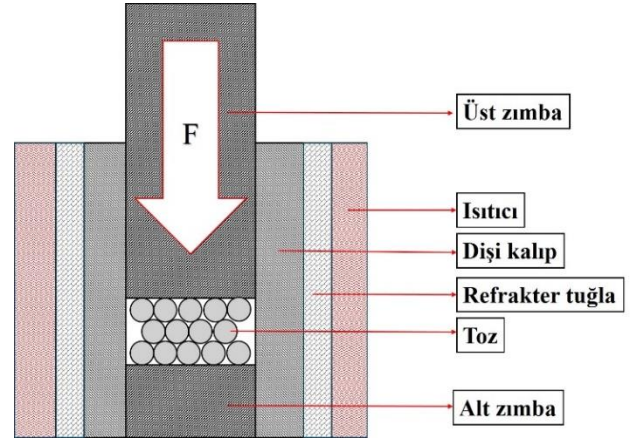
Şekil 1 incelendiğinde AlSi10Mg partiküllerin küresel bir morfolojiye sahip oldukları açık bir şekilde anlaşılmaktadır. Farklı SP parametreleri kullanılarak üretilen AlSi10Mg alaşıma ait üretim parametreleri Tablo 2'de yer almaktadır. Tablodan da anlaşılacağı üzere N0 numunesinde oda sıcaklığında soğuk pres işlemi, N1, N2 ve N3 numunelerine ise sırasıyla 450°C, 500°C ve 550°C sıcaklıklarda 500 MPa basınç altında 3 saat süreyle SP işlemi uygulanmıştır. Söz konusu prosedüre ait grafik gösterimi Şekil 2'de verilmiştir.

Tablo 2. AlSi10Mg alaşımına ait SP parametreleri

Numune kodu (AlSi10Mg)	SP		
	Sıcaklık (°C)	Basınç (MPa)	Süre (saat)
N0	(Oda Sıcaklığı)		
N1	450		
N2	500	500	3
N3	550		

AlSi10Mg malzemelerine ait mikroyapısal incelemeler için alaşım numuneleri zımparalama, parlatma ve dağlama işlemlerine tabi tutuldu. Dağlama, Struers Lectropol cihazı kullanılarak floroborik asit ile elektro dağlama yoluyla gerçekleştirildi. Alaşımın mikro yapıları Zeiss Axio Observer A1m optik mikroskobu kullanılarak incelendi. SP işlemleri vakum atmosferinde gerçekleştirilmiştir. SP işlemleri için MSE marka zaman ayarlı ve vakumlu SP makinesi kullanılmıştır. Numuneler 30 mm çapa sahip

silindirik bir kalıp kullanılarak üretilmiştir. Üretilen ürünlerin nihai kalınlıkları 15 mm'dir.



Şekil 2. Sıcak presleme işleminin grafiksel gösterimi

Numunelerin mikrosertlik testleri Struers Duramin A/S DK-2750 cihazı kullanılarak 500 g yük altında gerçekleştirildi. Sertlik testleri, Nemesis 9000 test cihazı ile 2.5 mm çapında çelik bilya ve 62.5 kg yük kullanılarak Brinell sertlik ölçüm yöntemi kullanılarak belirlendi. Hem mikrosertlik hem de sertlik testlerindeki değerler, en az 5 ölçümün ortalaması alınarak belirlenmiştir. Numunelerin çekme mukavemeti testleri ASTM:E8 standartlarına uygun ve $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ deformasyon oranında INSTRON 3382 Universal çekme cihazında gerçekleştirildi. Darbe testleri, ASTM: E23 standartlarına uygun olarak 3x4x26 mm boyutunda ve 50 J kapasiteli Ceast 9050 Charpy makinesinde en az 3 ölçümün ortalaması alınarak belirlendi. Numunelerin çekme ve darbe deneylerinden elde edilen kırılma yüzeylerinin SEM görüntülerini elde etmek için Zeiss Evo LS10 cihazı kullanıldı. Yoğunluk ölçümleri Arşimet yoğunluk ölçümü prensibi doğrultusunda çözelti olarak saf su (yoğunluk: 1 gr/cm³) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

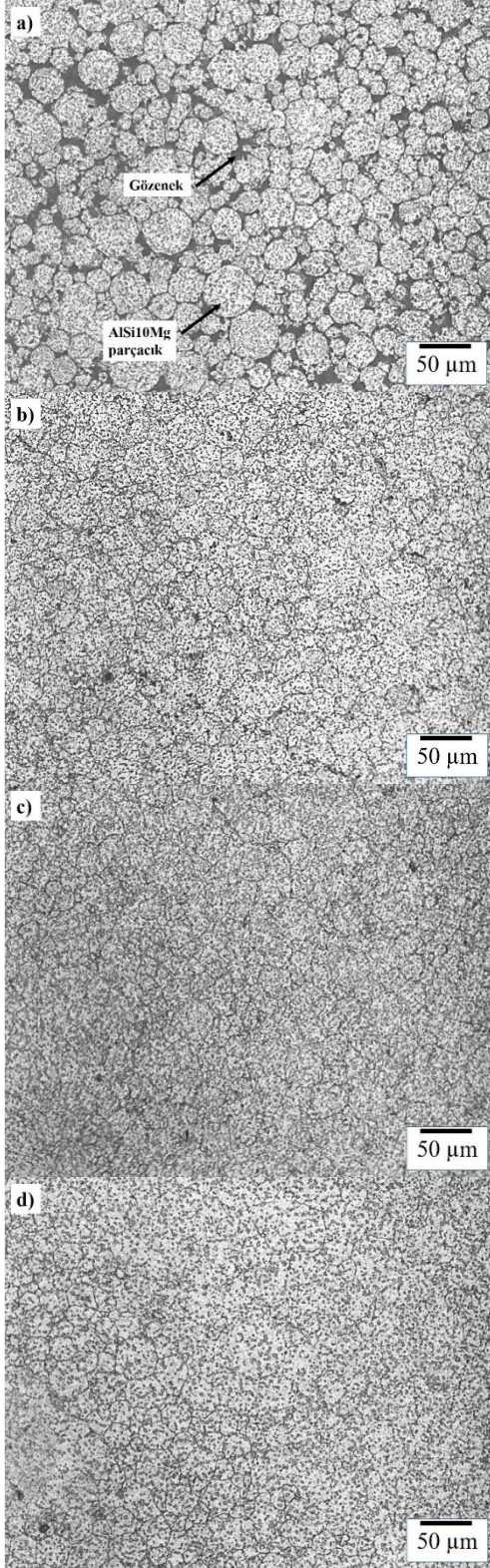
3 Bulgular ve tartışma

3.1 Mikroyapı

Şekil 3 (a-d), soğuk presleme yapılmış (N0), 450°C (N1), 500°C (N2) ve 550°C (N3) sıcaklıklarında sıcak presleme uygulanmış AlSi10Mg alaşım numunelerinin mikro yapısını göstermektedir. Soğuk presleme ile yoğunlaştırılmış alaşım numunelerinin mikro yapısında Si (silisyum) parçacıkları ve α -Al fazı gözlemlenmiştir. Ayrıca, soğuk presleme yapılan numunede çok sayıda porozitenin varlığı gözlemlendi. Bu durum AlSi10Mg alaşımın katılaşma davranışı ile açıklanabilir. Şöyle ki; AlSi10Mg alaşımının döküm halindeki katılaşma davranışı incelendiğinde, erimiş alaşım soğumaya başladığında ilk α (Al) çekirdeği oluşur. Sıcaklık düştükçe α (Al) fazı büyümeye başlar. AlSi10Mg alaşımının kimyasal bileşimi ötektik noktaya yaklaştıkça silikon ve magnezyum reaksiyona girerek katılaşma tamamlanır [26, 27].

AlSi10Mg alaşımına 450°C, 500°C ve 550°C sıcaklıklarında sıcak pres uygulanması sonucu elde edilen iç

yapılarının nispeten birbirine benzer olduğu belirlenmiştir. Ancak, artan sıcaklıkla birlikte α -Al fazında bir büyümenin olduğu göze çarpmaktadır.



Şekil 3. Soğuk presleme yapılmış (a), 450°C (b), 500°C (c) ve 550°C (d) sıcaklıklarında sıcak presleme sonucu AlSi10Mg alaşımının mikro yapısını gösteren optik fotoğraflar

Ayrıca, artan sıcaklık miktarı ile birlikte yoğunlaşmanın daha iyi olduğu, mikroyapıdaki porozite miktarının azaldığı ve Si parçacıklarının nispeten yapıya daha homojen ve küresel bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Bu durum difüzyon mekanizması ile açıklanabilir. Şöyle ki; diğer çalışmalarda silisyum atomlarının Al atomlarına göre daha hızlı difüzyon hızı sergiledikleri belirtilmiştir [14–19, 26, 27]. Bu, silisyum parçacıklarının parçalanarak nispeten küresel bir forma dönüşmesine ve yapı boyunca homojen bir şekilde dağılmasına neden olur. Ayrıca, artan sıcaklıkla birlikte yoğunlaşmanın iyileşmesi beklenen bir durumdur. Dolayısıyla en düşük porozite miktarı en yüksek pres sıcaklığı olan 550°C’de gerçekleşmiştir.

3.2 Yoğunluk ve sertlik değerleri

Soğuk presleme yapılan N0 numunesine ve 450°C, 500°C ve 550°C sıcaklıklarında sıcak pres uygulaması yapılan N1, N2 ve N3 kodlu numunelere ait sertlik, mikrosertlik ve yoğunluk değerleri Tablo 3’de verilmiştir. Alaşımın her bir pres sıcaklığı için sertlik ve mikrosertlik değerleri ile yoğunluk değerlerinin benzer değişiklikler gösterdiği belirlenmiştir. Buna göre, artan pres sıcaklığı değerleriyle sertlik, mikrosertlik ve yoğunluk değerleri sürekli bir artış sergilemiştir. Bu değişiklikler, farklı pres sıcaklıklarına tabi tutulan AlSi10Mg alaşımının mikroyapılarının incelenmesiyle açıklanabilir [14-19]. Soğuk pres durumunun aksine AlSi10Mg alaşımındaki porozite miktarı artan pres sıcaklığı ile birlikte nispeten ortadan kaybolmuştur. Ayrıca artan pres sıcaklığı ile Si parçacıkları nispeten daha küresel hale dönüşerek içyapı içerisine homojen dağıldığı görülmektedir. Sert ve gevrek olan Si parçacıkları içyapıya homojen ve küresel bir şekilde dağılması sertlik değerlerinin artmasına neden olmuştur. Her ne kadar artan pres sıcaklığı ile birlikte α -Al tanelerinde bir büyümenin olduğu göze çarpsa da, azalan porozite miktarı ve Si parçacıklarının iç yapıya homojen dağılması bu duruma daha baskın hale gelerek sertlik ve yoğunluk değerlerini artırmıştır. Buna ek olarak, içyapıya homojen dağılmış olan Si parçacıklarının α -Al fazına göre daha sert ve gevrek olması sertlik değerlerinde bir artışa neden olmuştur.

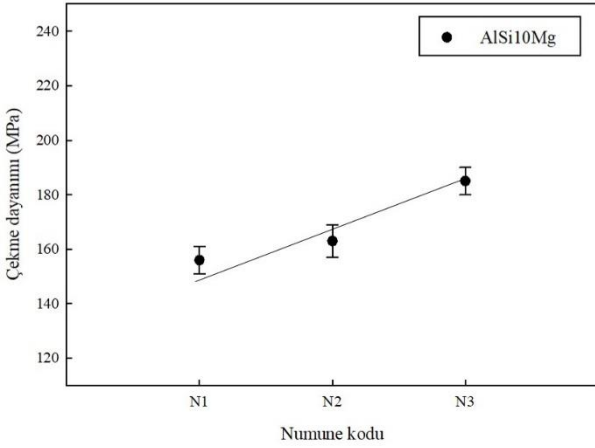
Tablo 3. N0, N1, N2 ve N3 kodlu numunelere ait sertlik, mikrosertlik ve yoğunluk değerleri

Numune kodu	Yoğunluk (gr/cm ³)	Bağlı yoğunluk (%)	Sertlik (BSD)	Mikrosertlik (VSD)
N0	2.3523	89.10	40.17±2	35±3
N1	2.6165	99.11	49.44±3	57±3
N2	2.6191	99.21	51.60±2	59±2
N3	2.6287	99.57	58.77±3	70±3

3.3 Çekme dayanımı ve kırılma yüzeyleri

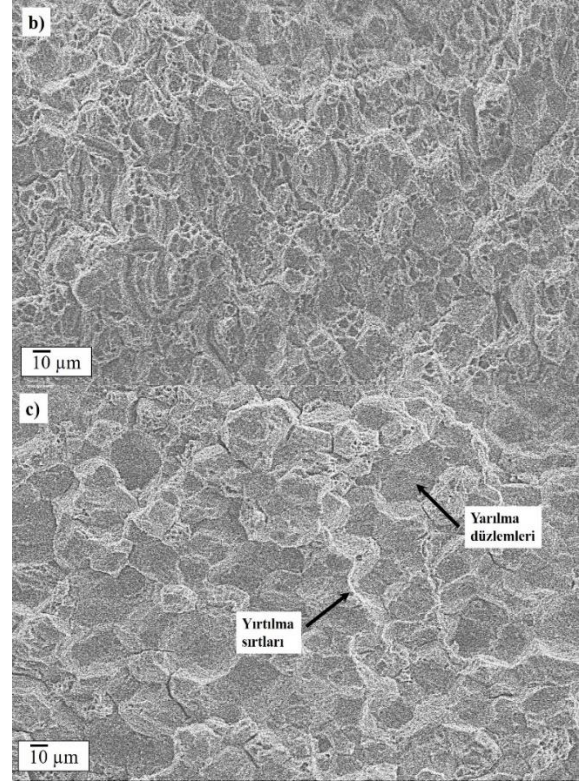
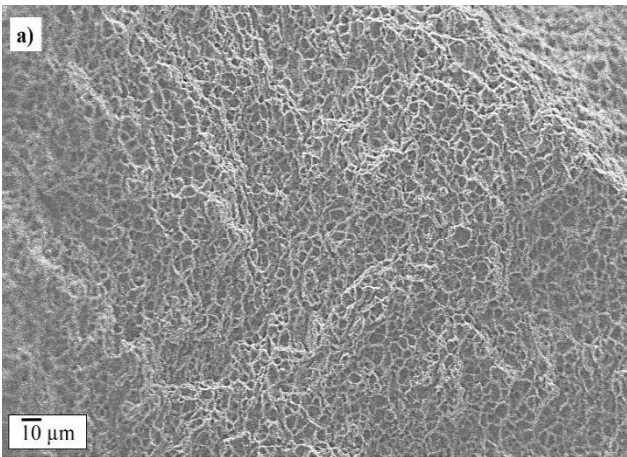
450°C, 500°C ve 550°C sıcaklıklarında sıcak pres uygulaması yapılan N1, N2 ve N3 kodlu ve numunelere ait çekme dayanımı değerleri Şekil 4’de verilmiştir. Soğuk presleme yapılan N0 numunesinde tam yoğunlaşma sağlanamadığı ve aşığı gevrek olduğu dolayısıyla çekme dayanım değeri belirlenememiştir. Alaşımın çekme dayanımı değerlerinin yukarıda bahsedildiği gibi sertlik değerleri ile benzer bir eğilim sergileyerek artan SP sıcaklığı ile artan bir değişim göstermiştir. Buna göre, çekme dayanım

değerlerinde en yüksek çekme dayanım değeri N3 numunesinde 186 MPa olarak, en düşük çekme dayanım değeri ise N1 numunesinde 156 MPa olarak belirlenmiştir. Bu durum, SP sıcaklıklarına tabi tutulan alaşımların içyapısıyla ilişkilendirilebilir. Şöyle ki; yukarıda bahsedildiği gibi soğuk pres uygulaması yapılan alaşımda prozite miktarının çok fazla olduğu göze çarpmaktadır. Artan pres sıcaklığı ile birlikte ortadan yok olan gözenekler ve Si parçacıklarının yapıya homojen ve nispeten küresel şekilde yayılması, bu sert ve gevrek parçacıkların yük taşıma etkisi ile birlikte çekme dayanımı değerlerini iyileştirmiştir.



Şekil 4. N1, N2 ve N3 kodlu numunelere ait çekme dayanımı değerleri

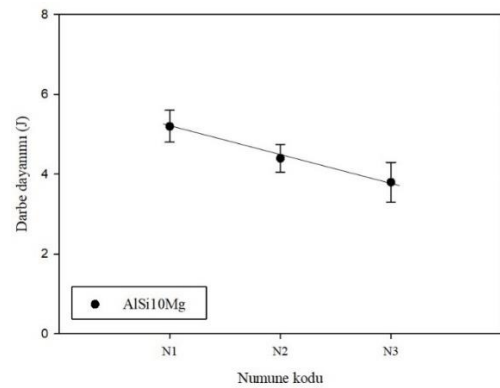
N1, N2 ve N3 kodlu ve farklı sıcaklıklarda SP uygulanan çekme numunelerinin kırılma yüzeylerinin SEM fotoğrafları Şekil 5 (a-c)'de verilmiştir. Bu görsellere bakıldığında kırılma yüzeylerinin az miktarda yarılma düzlemlerinden (YD) ve çoğunlukla yırtılma sırtlarından (YS) oluştuğu görülmüştür. Artan sertlik miktarıyla birlikte yarılma düzlemlerinin genişliğinin nispeten arttığı yırtılma sırtlarının sayısının ise azaldığı görülmektedir. YD'nin silisyum içeren sert fazlardan oluştuğu, yırtılma sırtlarının ise yumuşak $\alpha(\text{Al})$ fazlarına sahip olduğu unutulmamalıdır. Farklı sıcaklıklarda SP uygulanan bütün numunelerde benzer kırılma yüzeyi özellikleri gözlemlendi.



Şekil 5. N1(a), N2(b) ve N3(c) kodlu numunelere ait çekme testlerinden elde edilen kırılma yüzeylerinin SEM fotoğrafları

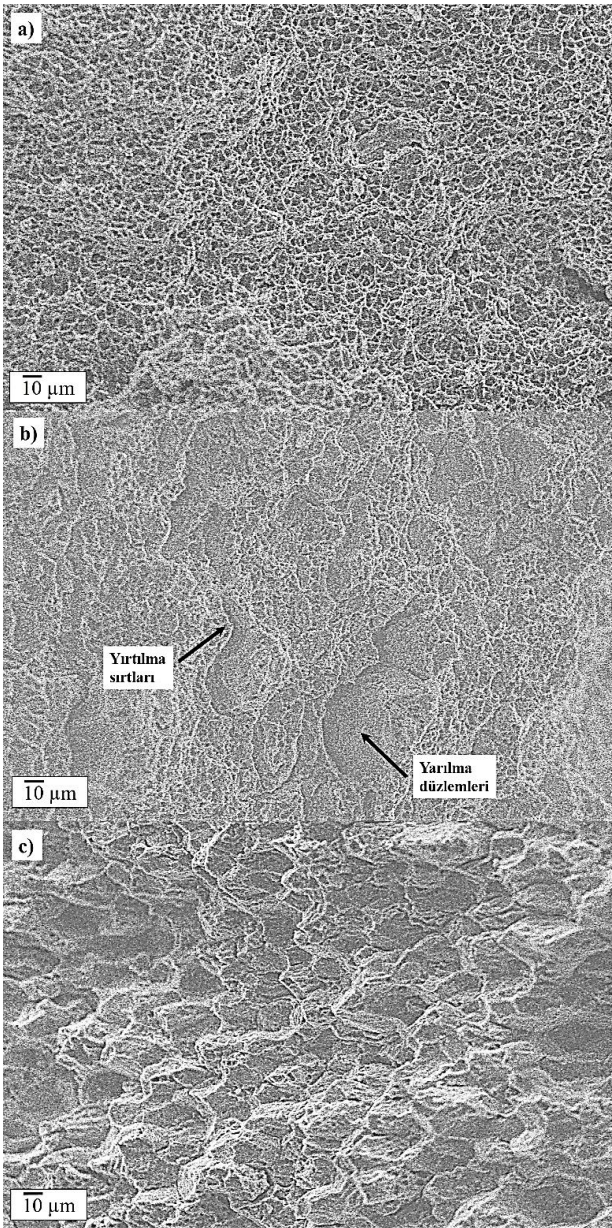
3.4 Darbe dayanımı ve kırılma yüzeyleri

450°C, 500°C ve 550°C sıcaklıklarında sıcak pres uygulaması yapılan N1, N2 ve N3 kodlu ve numunelere ait darbe dayanımı değerleri Şekil 6'de verilmiştir. Soğuk presleme yapılan N0 numunesinde tam yoğunlaşma sağlanamadığı, aşığı gevrek olduğu ve ufalanma gerçekleştiği dolayısıyla darbe dayanım değeri belirlenememiştir. Şekil 6'de görüldüğü gibi artan SP sıcaklığı ile birlikte darbe dayanımı azalmaktadır. Bu değişiklikler alaşımların mikro yapısı ile açıklanabilir. N1, N2 ve N3 kodlu Al-10Si-Mg alaşımlarındaki darbe dayanımı değerlerinin artan SP sıcaklığı ile birlikte sürekli azalması içyapıda bulunan Si parçacıklarının çentik etkisi yaratmasından kaynaklanmış olabileceği değerlendirilmiştir.



Şekil 6. N1, N2 ve N3 kodlu numunelere ait darbe dayanımı değerleri

450°C, 500°C ve 550°C sıcaklıklarında sıcak pres uygulaması yapılan N1, N2 ve N3 kodlu AlSi10Mg alaşımlarının darbe deneylerinden elde edilen kırılma yüzeylerinin SEM fotoğrafları Şekil 7'de gösterilmektedir. Alaşım numunelerinin kırılma yüzeylerinin çekme numunelerinin kırılma yüzeylerine benzer bir morfolojide olduğu tespit edilmiştir. Buna göre her bir numunenin kırılma yüzeylerinin az miktarda yarıma düzlemlerinden (YD) ve çoğunlukla yırtılma sırtlarından (YS) oluştuğu görülmüştür. Artan SP sıcaklığı ile birlikte darbe deneylerinden elde edilen kırılma yüzeylerinde yarıma düzlemlerinin genişliği nispeten artmış, sayısı ise azalmıştır. Ayrıca, kırılma yüzeylerinden artan pres sıcaklığı ile birlikte sertlikte meydana gelen artış dolayısıyla tipik bir gevrek kırılma davranışı görülmektedir.



Şekil 7. N1, N2 ve N3 kodlu numunelere ait darbe testlerinden elde edilen kırılma yüzeylerinin SEM fotoğrafları

Bu durum numunelerin iç yapıları ile ilişkilendirilebilir. AlSi10Mg alaşımındaki Si parçacıkları presleme sıcaklığı arttıkça homojen ve küresel bir şekilde içyapıya dağılmaktadır. Si parçacıklarının sert ve gevrek olması ve α -Al tanelerine küresel şekilde yerleşmesi YD'nin sayısını artırmakta, YS'nin sayısını ise nispeten azaltmaktadır. Buna göre artan sertlik değeriyle birlikte yarıma düzlemlerinin genişliğinin nispeten gevrekleşmeden dolayı arttığı, yırtılma sırtlarının ise azaldığı gözlenmiştir.

4 Sonuçlar

Elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır:

- Farklı sıcaklıklarda SP işlemine tabi tutulan N1, N2 ve N3 kodlu numunelerin içyapılarındaki Si parçacıklarının, soğuk presleme yapılan N0 numunesine göre daha homojen ve küresel bir şekilde yapıya dağıldığı gözlemlenmiştir.
- SP yapılan numunelerin içyapılarında bulunan porozite miktarının artan sıcaklık miktarı ile sürekli azaldığı gözlenmiştir.
- N0, N1, N2 ve N3 kodlu numunelerde elde edilen yoğunluk, sertlik ve mikrosertlik değerlerinin artan presleme sıcaklık miktarı ile sürekli arttığı belirlendi. Buna göre en yüksek sertlik değerini N0 numunesine kıyasla yaklaşık %45 artış sergileyen N3 numunesi göstermiştir.
- Numunelerin çekme dayanım değerlerine bakıldığında çekme dayanım değerlerinde en yüksek çekme dayanım değeri N3 numunesinde 186 MPa olarak, en düşük çekme dayanım değeri ise N1 numunesinde 156 MPa olarak belirlenmiştir. Buna göre, N3 numunesi N1 numunesine göre %20 oranında yüksek çekme dayanımı performansı göstermiştir.
- Çekme deneylerinden elde edilen kırılma yüzeylerinde, artan presleme sıcaklığı ile sertliğin artmasından dolayı daha fazla sayıda yarıma düzlemleri oluşmuştur.
- Çentik etkisi yapan Si parçacıklarının yapıya homojen ve küresel bir şekilde yayılması darbe dayanımının düşmesine neden olmuştur. N1 numunesi 5,4 J N3 numunesi ise 3,8 J darbe dayanımı sergilemiştir. Buna göre N1 numunesinin darbe dayanımı, N3 numunesine göre yaklaşık %35 oranında yüksek değerdedir.
- Darbe deneylerinden elde edilen kırılma yüzeylerinde artan sertlik değerleri ile birlikte gevrek bir kırılma sergilediği belirlenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %5

Kaynaklar

- [1] L. Griffing, Aluminum and Aluminum Alloys, Welding Handbook. Springer, Macmillan Education UK, 319-479, 1972.
- [2] L. Girelli, M. Giovagnoli, M. Tocci, A. Pola, A. Fortini, M. Merlin, and G.M. La Vecchia, Evaluation

- of the impact behaviour of AlSi10Mg alloy produced using laser additive manufacturing, *Materials Science and Engineering: A*, 748, 38–51, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.078>.
- [3] L. Lattanzi, A. Fortini, M. Giovagnoli, and M. Merlin, Influence of Mg and Ti on both eutectic solidification and modifying efficiency in Sr-modified Al-7Si cast alloys, *Metallurgia Italiana*, 110 (2), 5–15, 2018.
- [4] N. Takata, H. Kodaira, K. Sekizawa, A. Suzuki, and M. Kobashi, Change in microstructure of selectively laser melted AlSi10Mg alloy with heat treatments, *Materials Science and Engineering: A*, 704, 218–28, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.08.029>.
- [5] M. Fousová, D. Dvorský, A. Michalcová, and D. Vojtěch, Changes in the microstructure and mechanical properties of additively manufactured AlSi10Mg alloy after exposure to elevated temperatures, *Materials Characterization*, 137, 119–26, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.01.028>.
- [6] A. H. Maamoun, M. Elbestawi, G. K. Dosbaeva, and S. C. Veldhuis, Thermal post-processing of AlSi10Mg parts produced by Selective Laser Melting using recycled powder, *Additive Manufacturing*, 21, 234–47, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.014>.
- [7] S. J. Andersen, C. D. Marioara, R. Vissers, A. Frøseth, and H. W. Zandbergen, The structural relation between precipitates in Al-Mg-Si alloys, the Al-matrix and diamond silicon, with emphasis on the trigonal phase U1-MgAl₂Si₂, *Materials Science and Engineering: A*, 444(1–2), 157–69, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.08.084>.
- [8] R. Vissers, M. A. van Huis, J. Jansen, H. W. Zandbergen, and C.D.M.S.J. Andersen, The crystal structure of the β' phase in Al-Mg-Si alloys, *Acta Materialia*, 55 (11), 3815–3823, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.02.032>
- [9] H. Chen, J. Lu, Y. Kong, K. Li, T. Yang, A. Meingast, M. Yang, Q. Lu, and Y. Du, Atomic scale investigation of the crystal structure and interfaces of the B' precipitate in Al-Mg-Si alloys, *Acta Materialia*, 185, 193–203, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.11.059>.
- [10] H.W. Zandbergen, S.J. Andersen, and J. Jansen, Structure determination of Mg₅Si₆ particles in Al by dynamic electron diffraction studies, *Science*, 277(5330), 1221–1225, 1997. <https://doi.org/10.1126/science.277.5330.1221>.
- [11] J.H. Rao, Y. Zhang, K. Zhang, A. Huang, C.H.J. Davies, and X. Wu, Multiple precipitation pathways in an Al-7Si-0.6Mg alloy fabricated by selective laser melting, *Scripta Materialia*, 160, 66–69, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.09.045>.
- [12] S. Marola, D. Manfredi, G. Fiore, M.G. Poletti, M. Lombardi, P. Fino, and L. Battezzati, A comparison of Selective Laser Melting with bulk rapid solidification of AlSi10Mg alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 742, 271–279, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.309>.
- [13] T. Maeshima and K. Oh-ishi, Solute clustering and supersaturated solid solution of AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting, *Heliyon*, 5(2), 2019. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01186>.
- [14] G. Atxaga, A. Pelayo, and A. M. Irisarri, Effect of microstructure on fatigue behaviour of cast Al-7Si-Mg alloy, *Materials Science and Technology*, 17(4), 446–450, 2001. <https://doi.org/10.1179/026708301101510023>.
- [15] K. T. Kashyap, S. Murali, K. S. Raman, and K. S. S. Murthy, Casting and heat treatment variables of Al-7Si-Mg alloy, *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 9(3), 189–204, 1993. <https://doi.org/10.1179/mst.1993.9.3.189>.
- [16] Z. Y. Ma, S. R. Sharma, and R. S. Mishra, Microstructural modification of As-cast Al-Si-Mg alloy by friction stir processing, *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 37(11), 3323–3336, 2006. <https://doi.org/10.1007/BF02586167>.
- [17] T. J. Hurley and R. G. Atkinson, Effects of modification practice on aluminum A-356 Alloys, *AFS Transactions*, 1985.
- [18] H. Hyer, L. Zhou, S. Park, G. Gottsfritz, G. Benson, B. Tolentino, B. McWilliams, K. Cho, and Y. Sohn, Understanding the laser powder bed fusion of AlSi10Mg alloy, *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 9(4), 484–502, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13632-020-00659-w>.
- [19] B. Chen, S. K. Moon, X. Yao, G. Bi, J. Shen, J. Umeda, and K. Kondoh, Comparison study on additive manufacturing (AM) and Powder Metallurgy (PM) AlSi10Mg Alloys, *Jom*, 70(5), 644–649, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11837-018-2793-4>.
- [20] J. Wu, X.Q. Wang, W. Wang, M.M. Attallah, and M.H. Loretto, Microstructure and strength of selectively laser melted AlSi10Mg, *Acta Materialia*, 117, 311–20, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.012>.
- [21] B. Chen, S. K. Moon, X. Yao, G. Bi, J. Shen, J. Umeda, and K. Kondoh, Strength and strain hardening of a selective laser melted AlSi10Mg alloy, *Scripta Materialia*, 141, 45–49, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.07.025>.
- [22] K. G. Prashanth, S. Scudino, H. J. Klaus, K. B. Surreddi, L. Löber, Z. Wang, A.K. Chaubey, U. Kühn, and J. Eckert, Microstructure and mechanical properties of Al-12Si produced by selective laser melting: Effect of heat treatment, *Materials Science and Engineering: A*, 590, 153–160, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.10.023>.
- [23] L. Thijs, K. Kempen, J.P. Kruth, and J. Van Humbeeck, Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder, *Acta Materialia*, 61(5), 1809–1819, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.11.052>.
- [24] K.G. Prashanth, S. Scudino, and J. Eckert, Defining the tensile properties of Al-12Si parts produced by selective laser melting, *Acta Materialia*, 126, 25–35, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.12.044>.
- [25] F.V. Lenel, *Powder Metallurgy Principles and*

- Applications. Metal Powder Industries Federation, 370, 1980.
- [26] G. S. Upadhyaya, Powder Metallurgy Technology. Cambridge Int Science Publishing, 2014.
- [27] R. Sundaresan and F.H. Froes, Mechanical Alloying, *Jom*, 39(8), 22–27, 1987. <https://doi.org/10.1007/BF03258604>.
- [28] J. C. Hastie, J. Koelblin, M. E. Kartal, M. M. Attallah, and R. Martinez, Evolution of internal pores within AlSi10Mg manufactured by laser powder bed fusion under tension: As-built and heat treated conditions, *Materials and Design*, 204, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109645>.
- [29] Q. Xu, W. Li, Y. Yin, J. Zhou, and H. Nan, Finite element simulation of real cavity closure in cast Ti6Al4V alloy during hot isostatic pressing, *China Foundry*, 8, 2022. <https://doi.org/10.1007/s41230-022-1173-4>
- [30] W. Schneller, M. Leitner, S. Pomberger, S. Springer, F. Beter, and F. Grün, Effect of post treatment on the microstructure, surface roughness and residual stress regarding the fatigue strength of selectively laser melted AlSi10Mg structures, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3(4), 2019. <https://doi.org/10.3390/jmmp3040089>.
- [31] I. Rosenthal, R. Shneck, and A. Stern, Heat treatment effect on the mechanical properties and fracture mechanism in AlSi10Mg fabricated by additive manufacturing selective laser melting process, *Materials Science and Engineering: A*, 729, 310–322, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.05.074>.
- [32] J. G. Santos Macías, L. Zhao, D. Tingaud, B. Bacroix, G. Pyka, C. van der Rest, L. Ryelandt, and A. Simar, Hot isostatic pressing of laser powder bed fusion AlSi10Mg: parameter identification and mechanical properties, *Journal of Materials Science*, 57(21), 9726–9740, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07027-9>.
- [33] T. Hirata, T. Kimura, and T. Nakamoto, Effects of hot isostatic pressing and internal porosity on the performance of selective laser melted AlSi10Mg alloys, *Materials Science and Engineering: A*, 772, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138713>.
- [34] W.H. Kan, Y. Nadot, M. Foley, L. Ridosz, G. Proust, and J.M. Cairney, Factors that affect the properties of additively-manufactured AlSi10Mg: Porosity versus microstructure, *Additive Manufacturing*, 29, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100805>.
- [35] C. Ozay and O.E. Karlidag, Hot press sintering effects and wear resistance of the Al-B 4 C composite coatings of an AA-2024 alloy, *Materials Testing*, 63(12), 1150–1156, 2019. <https://doi.org/10.1515/mt-2021-0057>.





İndiyum katkılı LATP katı elektrolitinin yapısı ve katkılamanın iyonik iletkenlik üzerindeki etkisi

Structure of indium-doped LATP solid electrolyte and effect of doping on ionic conductivity

Fatih Öksüzöğlü^{1,*}  Gültekin Çelik² 

¹ Tarsus Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği, 33400, Mersin, Türkiye

² Selçuk Üniversitesi, Fen Fakültesi Fizik Bölümü, 42130, Konya, Türkiye

Öz

Katı hal piller için, oda sıcaklığında iyonik iletkenliği iyileştirmek için kalsinasyon tekniklerini iyileştirmek ve katı elektrolit sistemine uygun element katkısı yaygın olarak önerilmiştir. Element katkısı, LATP katı elektrolitlerinin fizikokimyasal ve elektrokimyasal özelliklerini artırmak için en doğru yöntemlerdendir. LATP sistemindeki titanyum bölgesinde indiyum katkısı kapsamlı bir şekilde incelenmemiştir. İndiyumun daha büyük iyonik yarıçapı ile kafes hacmini artırabileceği ve böylece iyonik iletkenliği artırabileceği varsayılmaktadır. Bu çalışmada, %10 indiyum katkılı $\text{LiAlTi}(\text{PO}_4)_3$ (LATP) katı elektrolitinin iyonik iletkenliği incelenmiştir. Sentezlenen $\text{LiAlInTi}(\text{PO}_4)_3$ (LAITP) katı elektrolit, sırasıyla X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) kullanılarak kristal yapısı, morfolojik özellikleri ve Li^+ iyon iletkenliği açısından karakterize edilmiştir. Sonuçlar, indiyum katkısının LATP'ye kıyasla nispeten daha düşük iyonik iletkenliğe rağmen, yine de tamamen katı hal lityum iyon piller için katı elektrolitlerin geliştirilmesini teşvik edebileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Katı hal batarya, İndiyum katkısı, Seramikler

1 Giriş

Katı hal bataryaları, geleneksel lityum-iyon bataryalara kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğu, gelişmiş güvenlik ve daha hızlı şarj süreleri sunma potansiyelleri nedeniyle enerji depolama alanında giderek daha önemli hale gelmektedir. Katı hal bataryalarına artan ilginin temel nedenlerinden biri, lityum-iyon bataryalarda bulunan yanıcı sıvı veya jel elektrolitler yerine katı elektrotlar ve elektrolitler kullanabilmeleridir. Son zamanlarda, yüksek performanslı inorganik katı elektrolitler [1, 2], organik ve inorganik elektrolitler arasındaki karışımlar [3, 4] önerilmekte ve çok dikkat çekmektedir. Sıvı bileşenin katı bir bileşenle değiştirilmesi, hatta yeniden tasarlanması gereken mevcut hücre üretim süreçleri için bir zorluk teşkil ettiğinden, yalnızca yeni katı elektrolitlerin geliştirilmesiyle sınırlı değildir. Son birkaç yılda, araştırma faaliyetleri, yeni hücre

Abstract

For solid-state batteries, improving calcination techniques to improve ionic conductivity at room temperature and appropriate element doping to the solid electrolyte system have been widely proposed. Element doping is one of the most accurate methods to improve the physicochemical and electrochemical properties of LATP solid electrolytes. The doping of indium at the titanium site in the LATP system has not been extensively studied. It is hypothesised that indium can increase the lattice volume with its larger ionic radius and thus increase the ionic conductivity. In this study, the ionic conductivity of 10% indium doped $\text{LiAlTi}(\text{PO}_4)_3$ (LATP) solid electrolyte was investigated. The synthesised $\text{LiAlInTi}(\text{PO}_4)_3$ (LAITP) solid electrolyte was characterised in terms of crystal structure, morphological properties and Li^+ ion conductivity using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and electrochemical impedance spectroscopy (EIS), respectively. The results show that indium doping, despite the relatively lower ionic conductivity compared to LATP, can still promote the development of solid electrolytes for all-solid-state lithium ion batteries.

Keywords: Solid state battery, Indium doping, Ceramics

işleme yollarının uyarlanmasına yeni üretime yönelik bileşenlerin katı hal teknolojisine birleştirilmesine yönelmiştir [5]. Performans, üretim hızı ve sürdürülebilirlik açısından verimli hücre üretimini sağlamak için farklı bileşenler ile tekrar gözden geçirilmektedir. Katot, katı elektrolitin ve tam hücrenin oluşturulması istenilen hücre performanslarını elde etmek için önemlidir.

Çok ince elektrolit ayırıcıların [6] kullanılması ve pozitif elektrotun [7] paketleme yoğunluğunun artması, enerji yoğunluğunun sınırlarını daha da yüksek değerlere çıkarmaktadır. Bu nedenle, katı hal pillerin üretimine, lityum iyon pillerin üretimine uygulanan mevcut olanlardan farklı olması beklenilmektedir. Katı elektrolitlerin oluşturduğu zorluklar, potansiyel akım yoğunluğunun limitleriyle ilgilidir; katı elektrolitin düşük iletkenliğinden ve yüksek dirençli katı-katı iç arayüzlerin varlığından kaynaklanır. Bu nedenle, yüksek iletken elektrolitlerin ve

*Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: oksuzogluf@gmail.com (F. Öksüzöğlü)

Geliş / Received: 03.06.2024 Kabul / Accepted: 13.09.2024 Yayımlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1495188

düşük dirençli arayüzlerin geliştirilmesi, katı hal pillerin karşılaştığı en önemli zorluklardan biridir. Başka bir zorluk, bu tür arayüzlerin oluşturduğu kararsızlıktır [8]. Döngü sırasında mekanik kararsızlık ve hücreler içindeki kimyasal ve elektrokimyasal kararsızlık, arayüzlerde istenmeyen reaksiyonların oluşmasına neden olmaktadır [9, 10]. Bu aynı zamanda hacim değişikliklerinden veya arayüzey gerilimlerinden kaynaklanan büyük iç dirençler ve mekanik sorunlar oluşturmaktadır [11]. Arayüz sorunlarını çözmek için üretim esnasında, malzeme ve üretim arasındaki dengeyi bulmak gerekir [12, 13]. Malzeme olarak, çoğunlukla katı elektrolitler grubundan inorganik katı hal elektrolitler (İKE) dikkate alınmaktadır.

NASICON tipi, perovskit tipi ve garnet tipi elektrolitler, katı hal lityum iyon piller için önemli potansiyel gösteren en önemli oksit bazlı elektrolitler arasındadır. Yüksek iyonik iletkenlik ve çevresel kararlılık gibi temel avantajları, onları bu uygulamalar için son derece uygun hale getirmektedir. Bu oksit bazlı elektrolitler, her biri benzersiz iyonik iletkenlikler ve kimyasal özellikler sergileyen ve katı hal lityum iyon pillere uygulanmalarında belirli zorluklara yol açan farklı yapısal tiplerine göre kategorize edilir. Adını sodyum süperiyonik iletken $\text{NaM}_2(\text{PO}_4)_3$ 'den ($M = \text{Ge}, \text{Ti}, \text{Zr}$) alan NASICON tipi katı elektrolitler, kristalin bir NASICON çerçevesine sahiptir. Bu çerçeve, köşe paylaşımli PO_4 tetrahedra ve MO_6 ($M = \text{Ge}, \text{Ti}, \text{Zr}$) oktahedradan oluşur ve üç boyutlu bir ağ yapısı oluşturur [14]. Bu yapıda, Na^+ iyonları interstisyel bölgelerde yer alır ve öncelikle c eksenı boyunca taşınır [15]. Na^+ , Li^+ ile ikame edildiğinde, NASICON tipi katı elektrolitler kristal yapıyı değiştirmeden Li^+ iyon iletkenleri olarak işlev görür. Bu NASICON tipi seramikler büyük ölçekli üretim için umut verici adaylar olarak tanımlanmıştır [16, 17]. Bu katı elektrolitler LTP ($\text{LiTi}_2(\text{PO}_4)_3$) lityum titanyum fosfat, LGP ($\text{LiGe}_2(\text{PO}_4)_3$) lityum germanyum fosfat ve LZP ($\text{LiZr}_2(\text{PO}_4)_3$) lityum zirkonyum fosfat gibi farklı yapılara sahiptir. Bu ana yapıya sahip malzemelere katkılar geliştirildi. Bu yapılar içerisinde LTP ve LGP mükemmel stabilite penceresi ve yüksek iletkenliğe sahiptir. LTP malzemesi, uzay grubu ($R3c$) ile eşkenar dörtgen simetriye sahiptir. LTP yapısı, yapının köşelerinde oksijen atomlarını paylaşarak ağı 3 boyutlu bir zincirini oluşturan oktahedronlar (TiO_6) ve tetrahedronlar (PO_4) bölgelerinden oluşur. Bu ağ zinciri, lityum iyon difüzyon yolunu oluşturmaktadır. LTP yapısı özellikle kafes geometrisi nedeniyle oldukça rijit ve karardır. Yapı sertliği, aralarında ortak bir oksijen atomunu paylaşan tetrahedronlardan (PO_4) alır. Bileşim, yapısının korunduğu farklı türlere katkı yapıldığında esneklik oluşturulabilir. Yapı iki katyonik M1 ve M2 alanları olarak adlandırılan boş alanlar M1 alanları, c eksenı boyunca birbirine bakan iki oktahedral alan (2MO_6) arasındaki boşluklardır. M2 bölgeleri, PO_4 'ün iki paralel zinciri arasındaki boşluklardır [18].

Bu çalışmada, $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$ (LATP) malzemesine ilk kez katı hal yöntemi ile indiyum katkılayarak yapısal ve elektrokimyasal özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Katkılama, katı elektrolitlerin özelliklerini optimize etmede kritik bir stratejidir ve indiyum ilavesi, LATP'nin kristal yapısını geliştirmeyi amaçlamaktadır. Malzemenin kristal

bütünlüğünün iyileştirilmesiyle, lityum iyonlarının hareketliliğinin kolaylaştırılması ve böylece genel iyonik iletkenliğin artırılması beklenmektedir. Sentezlenen LAITP katı elektrolitin kristal yapısı, morfolojik özellikleri ve Li^+ iyon iletkenliği sırasıyla X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) teknikleri ile incelenmiştir.

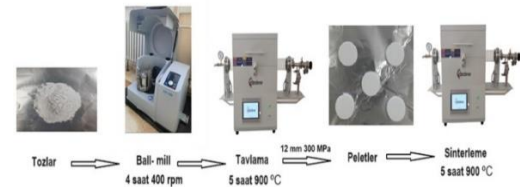
2 Materyal ve metot

2.1 LAITP'nin sentezlenmesi

Bu çalışmada, %10 indiyum oksit (In_2O_3) katkılanan $\text{Li}_{1+x}\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ti}_{(2-x-y)}\text{PO}_4$ (LAITP) seramikleri katı hal yöntemiyle sentezlenmiştir. Şekil 2'de Katı hal sentez yönteminin şematik görünümü verilmiştir. NASICON tipi, LAITP ($x = 0.3 \text{ Al}_2\text{O}_3$ $y = 0.1 \text{ In}_2\text{O}_3$) katı elektrolitin hazırlanması için Li_2CO_3 , (lityum karbonat, lityum oranındaki kaybı yüksek sıcaklıklarda dengelemek için %15 daha fazla karışıma eklendi), titanyum oksit (TiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3), indiyum oksit (In_2O_3) ve amonyum dihidrojen fosfat $\text{NH}_4\text{H}_2(\text{PO}_4)$ kimyasalları stokiometrik oranları hesaplanarak tartılmıştır. Daha sonra kimyasalları bilyalı öğütücü de 400 rpm'de 2 saat homojen bir şekilde karıştırıldıktan ve eritme için fırına konulduktan sonra, fırın önce 2 saat boyunca 450 °C'ye ayarlanarak hammaddelerin ayrışmasına izin verilmiş ve daha sonra 900 °C da 5 saat kalsine edilmiştir. Kalsine edilen tozlar bilyeli öğütücü de 400 rpm'de 5 saat boyunca tekrar öğütülmüştür. Öğütülen tozlar daha sonra pelet haline getirilmiştir. Tozlar 1.5-1.7 mm kalınlığında 1.2 cm çapındaki numunelere 2 dakika boyunca 300 Mpa basınç uygulanmıştır. Şekil 1'de LAITP örneğinin toz ve pelet formu verilmiştir. Çapı 1.2 cm olan pelet numuneleri bir alümina krozede 900 °C'de 5 saat boyunca fırında sinterlenmiştir. Son olarak, peletlerin her iki yüzeyi gümüş pasta ile kaplandıktan sonra 250 °C'deki fırında 1 saat bekletilmiştir.



Şekil 1. LAITP örneğinin (a) toz (b) pelet formu



Şekil 2. Katı hal sentez yönteminin şematik görünümü

2.2 LAITP malzemesinin karakterizasyonu

LAITP malzemesinin X-ışını kırınım analizi Selçuk Üniversitesi'nde (İLTEK) $\text{CuK}\alpha$ radyasyonu kullanılarak 2θ aralığında 10° ile 80° arasında gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin kristalit boyutunu (D nm) hesaplamak için **Denklem (1)**'de verilen Scherrer denklemi kullanılmıştır.

$$D = \frac{0.94 \lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

LAITP numunesinin mikro yapısal özellikleri ZEISS EVO LS10 taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Alternatif akım (AC) empedans ölçümleri simetrik hücrelerde iki adet paslanmaz çelik elektrot ile ölçülmüştür. Elektriksel iletkenlik ölçümleri Gamry PCI4/750 Potansiyostat cihazı ile oda sıcaklığında 0.1 Hz-1 MHz frekans aralığında 10 mV AC sinyali uygulanarak yapılmıştır. LAITP malzemesinin iyonik iletkenliklerini belirlemek için 12 mm'lik bir pelet kalıp seti kullanılarak ve bağlayıcı içermeyen LAITP tozları preslenmiştir. Malzemeye yaklaşık 300 MPa bir basınç uygulanarak ve 2 dakika boyunca sabit basınç altında tutulmuştur. Toplam iletkenlik (σ) **Denklem (2)** kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{1}{R} \frac{l}{A} \quad (2)$$

Burada, l, R ve A sırasıyla katı hal elektrolit peletlerinin kalınlığını, direncini ve alanını temsil etmektedir.

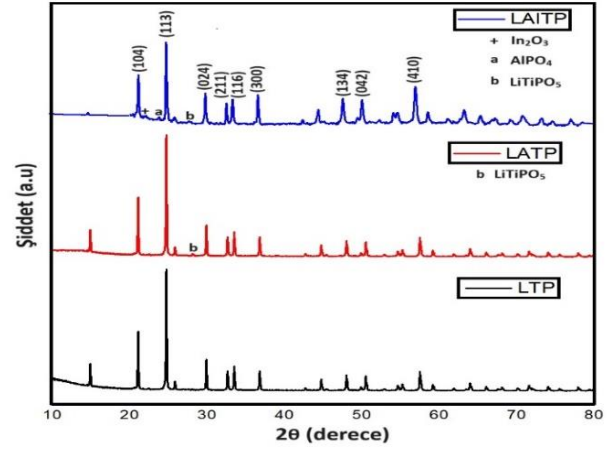
3 Bulgular ve tartışma

3.1 X-ışını toz kırınımı (XRD)

Şekil 3'de LAMP yapısına $x=0.1$ indiyum katkısı XRD kırınım desenleri verilmiştir. XRD grafiğinde LAITP ($x=0.1$) numunesinin Rhombohedral fazda oluşmaktadır. LAITP elektrolitlerinin XRD modellerindeki pikler, **Tablo 1**'de verilen Rietveld analizi ile uzay grubu $R\bar{3}c$ olan NASICON tipi $\text{LiTi}_2(\text{PO}_4)_3$ (LTP) (COD ID: 7222155) rombohedral fazına indekslenmiştir. Bu veriler Match programı yardımıyla analiz edilmiştir. Bu yapılar ait kırınım desenleri genel kristalografi cif dosyalarında ayrı ayrı analiz edilmiştir. **Şekil 3**'te tanımlanan LAMP pikleri, önceki araştırmamızda rapor edildiği gibi 900 °C'de sinterlenen LAMP numunesine karşılık gelmektedir [19]. LAITP örneğinde, In_2O_3 (+), AlPO_4 (a) ve LiTiPO_5 (b) safsızlık fazları gözlenmiş olup, **Tablo 1**'de LAITP numunesinin kristal yapıdaki safsızlık fazları analiz sonuçları verilmiştir. Örneklerde LiTiPO_5 oluşumu, toplu malzemelerdeki fazla fosfora atfedilir [20]. Bu ikincil fazlar,

LAMP'nin iyonik iletkenliğini etkiler. Li^+ kaybı nedeniyle sinterlenmiş LAMP peletinde [21] daha küçük AlPO_4 birim hücrelerinin oluşumu, LAMP seramik peletini yoğunlaştırabilir [22]. Ancak, AlPO_4 'ün varlığı numunelerdeki mutlak Al içeriğini azaltır ve böylece lityum iletkenliğini azaltır. Artan miktarda AlPO_4 , Li^+ tane sınırları boyunca taşınmasını engelleyebilir ve sonuçta genel iyonik iletkenliği azaltabilir. Bu nedenle, yoğunlaştırma ve iyonik iletkenliği dengelemek çok önemlidir. Katı elektrolit malzemelerin iyonik iletkenliği, yoğunlaştırma, AlPO_4 safsızlıkları ve gözeneklilik arasında dikkatli bir denge yoluyla optimize edilebilir [23]. İyonik yarıçapı 0,54 Å olan Al^{3+} , iyonik yarıçapı 0,60 Å olan Ti^{4+} ile karşılaştırıldığında daha küçüktür. Buna karşılık In^{3+} , Ti^{4+} 'den 0,79 Å ile biraz daha büyük bir iyonik yarıçapa sahiptir. **Tablo 1**'de gösterildiği gibi, a kafes parametresi azalırken c kafes parametresi nispeten artmaktadır. Bu da In^{3+} 'ün LAMP sistemi içerisinde Ti^{4+} bölgesine başarılı bir şekilde katıldığını göstermektedir. Hücre hacminde ortaya çıkan artış, lityum iyonlarının transfer hızını artırarak iyonik iletkenliğin iyileşmesine katkıda bulunur.

LAITP numunesinde LiTiPO_5 , In_2O_3 ve AlPO_4 LAITP numunesinin XRD desenleri literatürdeki çalışmalarla uyum içerisindedir [19, 24]. LAMP numunesinin kristalit boyut (D) değerleri **Tablo 2**'de verilmiştir. Kristalit boyut değerleri ortalama 27.0 nm boyutundadır.



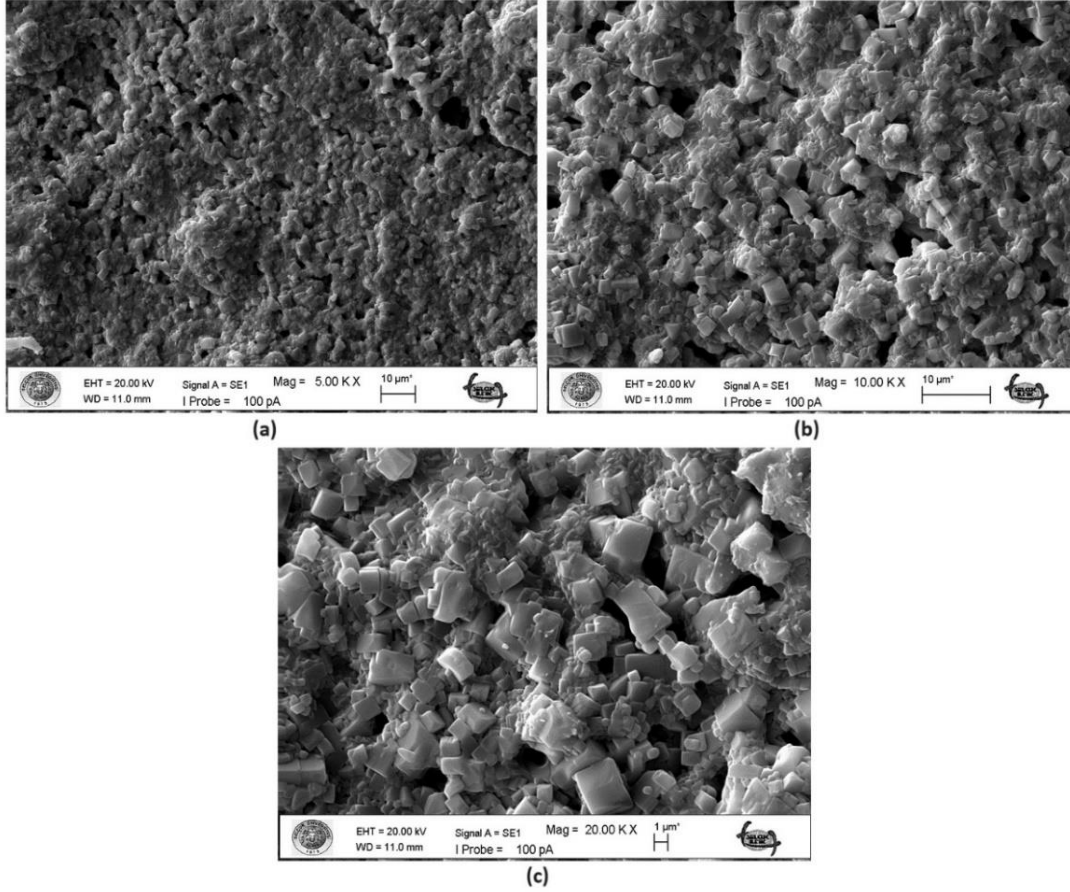
Şekil 3. LAMP ve LAITP katı elektrolitlerin XRD kırınım deseni

Tablo 1. LAITP numunesinin kristal yapı analiz sonuçları

Örnek	Kristal	a	β	γ	a (Å)	b (Å)	c (Å)	Geometri
LAITP	$\text{LiAlTi}(\text{PO}_4)_3$	90	90	120	8.454	8.454	20.906	Rhombohedral ($R\bar{3}c$)
	AlPO_4	90	90	90	18.521	32.124	8.400	Monoclinic (Cm:b1)
	LiTiPO_5	90	90	90	7.401	6.375	7.235	Orthorhombic (Pnma)
	In_2O_3	90	90	90	10.12	10.12	10.12	Kübik (I213)
LAMP	$\text{LiAlTi}(\text{PO}_4)_3$	90	90	120	8.507	8.507	20.843	Rhombohedral ($R\bar{3}c$)
	LiTiPO_5	90.45	91.31	117.19	6.904	7.197	7.903	Triclinic (P-1)

Tablo 2. LAITP numunesi için kristalit boyut (D) değerleri

2θ (°)	21.5	25.15	30.3	33.06	33.85	37.19	48.35	50.88	57.87
hkl	(104)	(113)	(024)	(211)	(116)	(300)	(134)	(042)	(410)
FWHM (rad)x10 ⁻³	0.29	0.26	0.29	0.27	0.30	0.28	0.37	0.37	0.4
D (nm)	28.62	32.0	28.62	30.74	27.68	29.67	22.45	22.45	20.74



Şekil 4. LAITP numunesinin a) 5.00 KX, b) 10.00 KX ve c) 20.00 KX farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri

3.2 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

LAITP katı elektrolitinin morfolojisi malzemelerin elektrokimyasal performansında önemli bir rol oynamaktadır. SEM verilerinden de görülebileceği gibi, LAITP partikülleri hazırlama yöntemlerine bağlı olarak farklı şekillere sahiptir. Şekil 4'te, LAITP peletinin morfolojisini incelemek amacıyla çeşitli büyütmeleleri gösteren taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri sunulmaktadır. Çeşitli büyütmelelerdeki taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri, önceki çalışmalarla tutarlı olarak kübik tanelerle karakterize edilen numunenin mikro yapısını ortaya koymaktadır [19, 25–27]. Görüntüler, minimum gözenekler veya taneler arası bağlantılar ile iyi kristallik ve düzgün parçacık dağılımını göstermektedir. Üretilen LAITP seramik, ortalama partikül boyutu 1 ila 10

μm arasında değişen kompakt bir yapı sergilemektedir. Lityum iyonlarının düzgün dağılımı, hareketleri engellenmediği için yüksek iyonik iletkenliğe katkıda bulunur [28].

3.3 Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS)

İyonik iletkenlikleri elde etmek için, LATP numunesi için empedans spektrumları Şekil 5'te gösterildiği gibi eşdeğer devresi kullanılarak uydurulmuştur.

Şekil 5'te iç kısmında gösterilen eşdeğer devre kullanılarak uydurulan dirençler Tablo 3'te verilmiştir. Eşdeğer devrenin ilk kısmı tane direncini (R_g), tane sınırını (R_{gb}) ve sabit faz elemanını (CPE) içerir ve eşdeğer devrenin ikinci kısmı CPE'yi, yük transfer direncini (R_{ct}) ve elektrolit-elektrot arayüzünde oluşan iyonların difüzyonuyla ilgili bir terim olan Warburg elemanını (W) içerir.

Tablo 3. LAITP örneği için uyum (fit) değerleri

Örnek	$R_b(\Omega)$	$Q_b(S.s^n)$	$R_{gb}(\Omega)$	$Q_{gb}(S.s^n)$	$R_{ct}(\Omega)$	$Q_{int}(S.s^n)$	Warburg	χ^2
LAITP	1.686×10^3	7.27×10^{-7}	495.6	2.89×10^{-7}	2.111×10^3	8.22×10^{-4}	8.59×10^{-7}	1.82×10^{-4}

Katı elektrolitin iletkenliğinin belirlenmesinde önemli bir rol oynayan ilk kısım doğrudan katı elektrolit malzemesinin kendisiyle ilgilidir. Bir sonraki kısım, elektrot ve elektrolit arasındaki iyon geçişlerini ifade eden kuyruk kısmını ifade eder. İlk bileşen, eşdeğer devrenin yarım dairesi ile kuyruk bölümünün kesişimi ile ilgilidir ve katı elektrolitin iletkenliğini ve hücrenin iç direncini belirlemekten sorumludur.

Literatürde katı hal sentez yöntemi ile üretilen saf L ATP numunesi iyonik iletkenlik değerleri 10^{-4} - 10^{-7} S cm^{-1} değerleri arasında değişmektedir [29–32]. Önceki araştırmamızda rapor edilen [19] saf L ATP numunesin toplam iyonik iletkenliği 1.3×10^{-3} S cm^{-1} değeri elde edilmiş olup, indiyum katılı L ATP numunesinin ise toplam iyonik iletkenliği 7.24×10^{-5} S cm^{-1} olarak bulunmuştur. Literatürde bildirilen [33], kalsinasyon yöntemleriyle birleştirilmiş sprey kurutma ile sentezlenen LAITP numunesinin iyonik iletkenlik değeri 1.7×10^{-4} S cm^{-1} değerine yakındır.

azaltılabilir. Daha yüksek iyonik iletkenlik elde etmek için katkılama oranının artırılması, farklı karıştırma hızları (500 ve 600 rpm) ve sinterleme sıcaklıklarının optimize edilmesinin gerekli olacağı düşünülmektedir.

Katı hal pillerle verimliliği artırmayı ve maliyetleri düşürmeyi amaçlayan araştırma ve geliştirmede devam eden çabalarla gelecek enerji depolama sistemleri üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olacağı düşünülmektedir. Yüksek iyonik iletkenlik elde etme ve katı elektrotlar ile elektrotlar arasında iyi bir temas sağlama gibi teknik zorlukların üstesinden gelme potansiyeline sahip katı hal pilleri, gelecekteki enerji depolama çözümlerinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Bu teknoloji, yalnızca daha uzun sürüş menzilleri ve daha kısa şarj süreleri sağlayarak elektrikli araç endüstrisinde devrim yaratmak için değil, aynı zamanda gelişmiş güvenlik ve güvenilirlikleri nedeniyle yenilenebilir enerji depolama, tüketici elektroniği ve tıbbi cihazlardaki uygulamalar için de umut vaat ediyor. Katı elektrolitlerdeki gelişmeler ülkemizde güncel elektrikli araçlar üzerinde önemli etkiler oluşturabilecektir. Böylelikle bu çalışma mevcut bataryaların yüksek enerji yoğunluğu ve güvenlik eksikliklerinin giderilmesinde önemli bir adım oluşturacaktır.

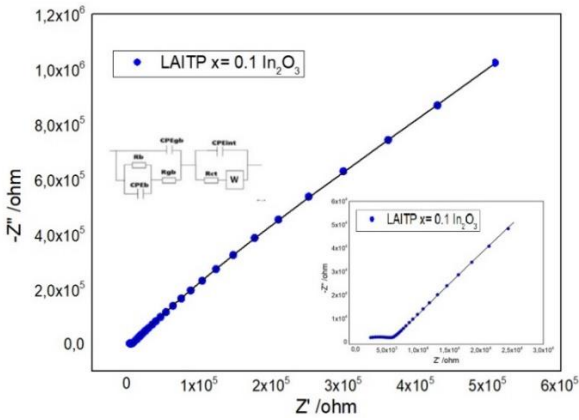
Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

- [1] Thangadurai, V., Pinzaru, D., Narayanan, S., Baral, A.K.: Fast solid-state Li ion conducting garnet-type structure metal oxides for energy storage. The journal of physical chemistry letters. 6, 292–299, 2015. <https://doi.org/10.1021/jz501828v>
- [2] Liu, Q., Geng, Z., Han, C., Fu, Y., Li, S., He, Y., Kang, F., Li, B.: Challenges and perspectives of garnet solid electrolytes for all solid-state lithium batteries. Journal of Power Sources. 389, 120–134, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.04.019>
- [3] Kumar, B., Scanlon, L.G.: Polymer-ceramic composite electrolytes. Journal of power sources. 52, 261–268, 1994. [https://doi.org/10.1016/0378-7753\(94\)02147-3](https://doi.org/10.1016/0378-7753(94)02147-3)
- [4] Tan, S.-J., Zeng, X.-X., Ma, Q., Wu, X.-W., Guo, Y.-G.: Recent advancements in polymer-based composite electrolytes for rechargeable lithium batteries. Electrochemical Energy Reviews. 1, 113–138, 2018. <https://doi.org/10.1007/s41918-018-0011-2>
- [5] Schnell, J., Günther, T., Knoche, T., Vieider, C., Köhler, L., Just, A., Keller, M., Passerini, S., Reinhart, G.: All-solid-state lithium-ion and lithium metal batteries—paving the way to large-scale production.



Şekil 5. LAITP katı elektrolitin Nyquist grafiği ve eşdeğer devresi

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, indiyum katılı L ATP numunesi ilk kez katı hal sentez yöntemi kullanılarak başarılı bir şekilde sentezlenmiştir. X-ışını kırınım analizi, L ATP elektrolitinde $LiTiPO_5$, In_2O_3 ve $AlPO_4$ 'ten gelen safsızlık fazlarının varlığını ortaya koyarken, SEM görüntüleri kübik benzeri parçacık yapılarını göstererek istenen yapı ve morfolojinin elde edildiğini doğruladı. Elde edilen toplam iyonik iletkenlik 7.24×10^{-5} S cm^{-1} olarak elde edilmiştir. Literatürde bildirilen değerlere kıyasla daha düşük iyonik iletkenlik göstermesi, yüksek sıcaklıkta kalsinasyon işlemi sırasında Li^+ içeriğinin hafif kütlelerine ve kolay buharlaşmasına bağlanabilir. Ayrıca $AlPO_4$ safsızlık fazının ortaya çıkması, Li^+ iyonlarının tane sınırları boyunca taşınmasını engelleyebilir ve genel iyonik iletkenliği

- Journal of Power Sources. 382, 160–175, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.02.062>
- [6] Wu, J., Rao, Z., Cheng, Z., Yuan, L., Li, Z., Huang, Y.: Ultrathin, flexible polymer electrolyte for cost-effective fabrication of all-solid-state lithium metal batteries. *Advanced Energy Materials*. 9, 1902767, 2019. <https://doi.org/10.1002/aenm.201902767>
- [7] Murata, K., Izuchi, S., Yoshihisa, Y.: An overview of the research and development of solid polymer electrolyte batteries. *Electrochimica Acta*. 45, 1501–1508, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(99\)00365-5](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(99)00365-5)
- [8] Xu, R.C., Xia, X.H., Zhang, S.Z., Xie, D., Wang, X.L., Tu, J.P.: Interfacial challenges and progress for inorganic all-solid-state lithium batteries. *Electrochimica Acta*. 284, 177–187, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.07.191>
- [9] Wang, Q., Ping, P., Zhao, X., Chu, G., Sun, J., Chen, C.: Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery. *Journal of power sources*. 208, 210–224, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.02.03>
- [10] Gao, Z., Sun, H., Fu, L., Ye, F., Zhang, Y., Luo, W., Huang, Y.: Promises, Challenges, and Recent Progress of Inorganic Solid-State Electrolytes for All-Solid-State Lithium Batteries. *Advanced Materials*. 30, 1705702, 2018. <https://doi.org/10.1002/adma.201705702>
- [11] Richards, W.D., Miara, L.J., Wang, Y., Kim, J.C., Ceder, G.: Interface stability in solid-state batteries. *Chemistry of Materials*. 28, 266–273, 2016. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.5b04082>
- [12] Yu, X., Manthiram, A.: Electrode–electrolyte interfaces in lithium-based batteries. *Energy & Environmental Science*. 11, 527–543, 2018. <https://doi.org/10.1039/C7EE02555F>
- [13] Tan, D.H., Banerjee, A., Chen, Z., Meng, Y.S.: From nanoscale interface characterization to sustainable energy storage using all-solid-state batteries. *Nature nanotechnology*. 15, 170–180, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0657-x>
- [14] Mariappan, C.R., Yada, C., Rosciano, F., Roling, B.: Correlation between micro-structural properties and ionic conductivity of Li_{1.5}Al_{0.5}Ge_{1.5}(PO₄)₃ ceramics. *Journal of Power Sources*. 196, 6456–6464, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.03.065>
- [15] Kumar, B., Thomas, D., Kumar, J.: Space-charge-mediated superionic transport in lithium ion conducting glass–ceramics. *Journal of The Electrochemical Society*. 156, A506, 2009. <https://doi.org/10.1149/1.3122903>
- [16] Liu, J., Liu, T., Pu, Y., Guan, M., Tang, Z., Ding, F., Xu, Z., Li, Y.: Facile synthesis of NASICON-type Li_{1.3}Al_{0.3}Ti_{1.7}(PO₄)₃ solid electrolyte and its application for enhanced cyclic performance in lithium ion batteries through the introduction of an artificial Li₃PO₄ SEI layer. *RSC Advances*. 7, 46545–46552, 2017. <https://doi.org/10.1039/C7RA09335G>
- [17] Waetzig, K., Rost, A., Heubner, C., Coeler, M., Nikolowski, K., Wolter, M., Schilm, J.: Synthesis and sintering of Li_{1.3}Al_{0.3}Ti_{1.7}(PO₄)₃ (LATP) electrolyte for ceramics with improved Li⁺ conductivity. *Journal of Alloys and Compounds*. 818, 153237, 2020. <https://doi.org/10.1039/C7RA09335G>
- [18] Epp, V., Ma, Q., Hammer, E.-M., Tietz, F., Wilkening, M.: Very fast bulk Li ion diffusivity in crystalline Li_{1.5}Al_{0.5}Ti_{1.5}(PO₄)₃ as seen using NMR relaxometry. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 17, 32115–32121, 2015. <https://doi.org/10.1039/C5CP05337D>
- [19] Öksüzöğlü, F., Ateş, Ş., Özkendir, O.M., Çelik, G., Eker, Y.R., Baveghar, H.: Structure and ionic conductivity of NASICON-type LATP solid electrolyte synthesized by the solid-state method. *Ceramics International*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.05.450>
- [20] Siller, V., Morata, A., Eroles, M.N., Arenal, R., Gonzalez-Rosillo, J.C., del Amo, J.M.L., Tarancón, A.: High performance LATP thin film electrolytes for all-solid-state microbattery applications. *Journal of Materials Chemistry A*. 9, 17760–17769, 2021. <https://doi.org/10.1039/D1TA02991F>
- [21] Arbi, K., Mandal, S., Rojo, J.M., Sanz, J.: Dependence of Ionic Conductivity on Composition of Fast Ionic Conductors Li_{1+x}Ti_{2-x}Al_x(PO₄)₃, 0 ≤ x ≤ 0.7. A Parallel NMR and Electric Impedance Study. *Chem. Mater.* 14, 1091–1097, 2002. <https://doi.org/10.1021/cm010528i>
- [22] Mariappan, C.R., Gellert, M., Yada, C., Rosciano, F., Roling, B.: Grain boundary resistance of fast lithium ion conductors: comparison between a lithium-ion conductive Li–Al–Ti–P–O-type glass ceramic and a Li_{1.5}Al_{0.5}Ge_{1.5}P₃O₁₂ ceramic. *Electrochemistry Communications*. 14, 25–28, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2011.10.022>
- [23] Campanella, D., Krachkovskiy, S., Faure, C., Zhu, W., Feng, Z., Savoie, S., Girard, G., Demers, H., Vijn, A., George, C., Armand, M., Belanger, D., Paoletta, A.: Influence of AlPO₄ Impurity on the Electrochemical Properties of NASICON-Type Li_{1.5}Al_{0.5}Ti_{1.5}(PO₄)₃ Solid Electrolyte. *ChemElectroChem*. 9, e202200984, 2022. <https://doi.org/10.1002/celec.202200984>
- [24] Li, J., Liu, C., Miao, C., Kou, Z., Xiao, W.: Enhanced ionic conductivity and electrochemical stability of Indium doping Li_{1.3}Al_{0.3}Ti_{1.7}(PO₄)₃ solid electrolytes for all-solid-state lithium-ion batteries. *Ionics*. 28, 63–72, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11581-021-04310-8>
- [25] Zhao, E., Guo, Y., Xu, G., Yuan, L., Liu, J., Li, X., Yang, L., Ma, J., Li, Y., Fan, S.: High ionic conductivity Y doped Li_{1.3}Al_{0.3}Ti_{1.7}(PO₄)₃ solid electrolyte. *Journal of Alloys and Compounds*. 782, 384–391, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.183>
- [26] Krasnikova, I.V., Pogosova, M.A., Sanin, A.O., Stevenson, K.J.: Toward Standardization of

- Electrochemical Impedance Spectroscopy Studies of Li-Ion Conductive Ceramics. *Chem. Mater.* 32, 2232–2241, 2020. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.9b04899>
- [27] Öksüzoğlu, F., Ateş, Ş., Özkendir, O.M., Çelik, G., Eker, Y.R., Baveghar, H., Basyooni-M. Kabatas, M.A.: The Impact of Boron Compounds on the Structure and Ionic Conductivity of LATP Solid Electrolytes. *Materials.* 17, 3846, 2024. <https://doi.org/10.3390/ma17153846>
- [28] Li, X., Zhou, Y., Tang, J., Zhao, S., Zhang, J., Huang, X., Tian, B.: Optimizing Li_{1.3}Al_{0.3}Ti_{1.7}(PO₄)₃ Particle Sizes toward High Ionic Conductivity. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 15, 36289–36300, 2023. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c06675>
- [29] Shen, S.-P., Tang, G., Li, H.-J., Zhang, L., Zheng, J.-C., Luo, Y., Yue, J.-P., Shi, Y., Chen, Z.: Low-temperature fabrication of NASICON-type LATP with superior ionic conductivity. *Ceramics International.* 48, 36961–36967, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.08.264>
- [30] Kwatek, K., Nowiński, J.L.: Electrical properties of LiTi₂(PO₄)₃ and Li_{1.3}Al_{0.3}Ti_{1.7}(PO₄)₃ solid electrolytes containing ionic liquid. *Solid State Ionics.* 302, 54–60, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2016.11.020>
- [31] Lin, Y., Luo, N., Quattrocchi, E., Ciucci, F., Wu, J., Kermani, M., Dong, J., Hu, C., Grasso, S.: Ultrafast high-temperature sintering (UHS) of Li_{1.3}Al_{0.3}Ti_{1.7}(PO₄)₃. *Ceramics International.* 47, 21982–21987, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.216>
- [32] Gunamony, J., Walle, K.Z., Kotobuki, M.: Influence of mixing technique on properties of Li_{1.3}Al_{0.3}Ti_{1.7}(PO₄)₃ solid electrolyte prepared by the solid-state reaction-A comparison of dry 3D mixing technique with wet ball-milling. *Solid State Ionics.* 410, 116528, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2024.116528>
- [33] Li, J., Liu, C., Miao, C., Kou, Z., Xiao, W.: Enhanced ionic conductivity and electrochemical stability of Indium doping Li_{1.3}Al_{0.3}Ti_{1.7}(PO₄)₃ solid electrolytes for all-solid-state lithium-ion batteries. *Ionics.* 1–10, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11581-021-04310-8>





The comparison study of PI and Sliding Mode control techniques for Buck-Boost converters

Kayan tipli denetim ve PI kontrol tekniklerinin Düşüren-Yükselten dönüştürücü için karşılaştırılması

Salah Hilo Al-Attwani¹ , Mustafa Teke^{2,*} , Enes Bektaş³ , Ethar Sulaiman Y. Yaseen⁴ ,
Yasin Bektaş⁵ , Zafer Civelek⁶ 

¹ Middle Technical University, Institute of Technology, 10066, Baghdad, Iraq

^{1,2,3,4,6} Çankırı Karatekin University, Electrical Electronics Engineering Department, 18100, Çankırı, Türkiye

⁵ Aksaray University, Electricity and Energy Department, 68100, Aksaray, Türkiye

Abstract

This paper compares the performance of a Sliding Mode Control (SMC) and Proportional-Integral (PI) controller under different voltage and load conditions. The study's findings underscore the need to account for load variations in system designs and to continuously seek system optimization irrespective of the controller type chosen. PI controller demonstrates effectiveness under certain circumstances. However, significant drops in voltage and current during abrupt load changes are obtained. On the other hand, SMC enables superior adaptability, efficiently managing voltage transients and load variations without any electrical disturbances, thereby maintaining system stability. A comparative analysis further emphasizes the SMC's superior time response and robustness against reference voltage changes. Consequently, SMC is proven to be a preferable choice over the PI controller in systems experiencing frequent voltage and load variations. However, both controllers achieve the potential for further response time optimization and stability.

Keywords: Buck-Boost converter, Power conversion, PI control, Sliding mode control

1 Introduction

DC-DC buck-boost converters are crucial components in various electrical and electronic systems, extending beyond photovoltaic applications. They can both increase and decrease the voltage level of an input power source, thus providing a regulated output voltage that aligns with the requirements of the connected loads. This feature is especially critical in scenarios where the input voltage is erratic or inconsistent [1-5].

Among the different control strategies used to govern the operation of these buck-boost converters, Proportional-Integral-Derivative (PID) control and sliding mode control are often implemented. The PID control strategy relies on a feedback mechanism from the output voltage, enabling adjustments to maintain stable output. Conversely, Sliding

Öz

Bu makalede, farklı voltaj ve yük koşulları altında Kayan Tipli Denetim Kontrol (SMC) ve Oransal-İntegral (PI) kontrolörün performansı karşılaştırmaktadır. Çalışmanın bulguları, sistem tasarımlarındaki yük değişimlerini hesaba katarak ve seçilen kontrolör tipine bakılmaksızın sürekli olarak sistem optimizasyonu arama ihtiyacının altını çizmektedir. PI kontrolörü belirli koşullar altında etkinlik göstermektedir. Ancak, ani yük değişimleri sırasında gerilim ve akımda önemli düşüşler elde edilebilmektedir. Öte yandan SMC, geçici voltaj geçişlerini ve yük değişimlerini herhangi bir elektriksel bozulma olmadan verimli bir şekilde yönetmektedir. Böylece sistem kararlılığını koruyarak SMC daha üstün uyarlanabilirlik sağlamaktadır. Karşılaştırmalı analiz ayrıca SMC'nin üstün zaman tepkisini ve referans voltajı değişikliklerine karşı etkinliğini göstermektedir. Sonuç olarak, SMC'nin, sık gerilim ve yük değişimlerinin yaşandığı sistemlerde PI denetleyiciye göre daha çok tercih edilebilir olduğu kanıtlanmıştır. Ancak her iki kontrol yöntemi de etkili sistem cevabı ve kararlılığını yakalayabilecek seviyede performans göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Düşüren-Yükselten dönüştürücü, Güç dönüşümü, PI kontrol, Kayan tipli denetim kontrol

Mode Control (SMC), being robust and not reliant on feedback, is less sensitive to system disturbances [6-9].

The objective of this study is to identify the more effective control strategy between PID control and sliding mode control, as well as to offer valuable insights that could guide future improvements in the design and operation of DC-DC buck-boost converters. This comparison is expected to significantly contribute to the field of power electronics and control systems. This paper aims to compare the performance of PI and SMC. The analysis will focus on their ability to regulate output voltage under varying input conditions and their overall impact on the efficiency of the system into which they are integrated.

This paper is organized as follows: In Section 2, Literature review is presented. Then, DC-DC Buck-Boost

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mustafateke@karatekin.edu.tr (M. Teke)

Geliş / Received: 27.03.2024 Kabul / Accepted: 14.09.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1459414

converter details are given in Section 3. Section 4 includes evaluation of proposed control techniques; PI and Sliding Mode Control. In Section 5, results are presented for each control methods. Finally, the main ideas of the paper are summed up, and Conclusions are presented in Section 6.

2 Literature review

This Section includes the research that has already been done on the use of Sliding Mode Controller, PID, and Second Order Sliding Mode to regulate the Buck-Boost converter. Switch-mode power sources often employ DC-DC converters. The popularity of these switch-mode DC-DC converters is growing for a variety of reasons, including their suitability for a variety of applications. This indicates that the main issues with switching converters are analysis, control, and stability.

In power electronics, buck-boost converters are often used to modulate the output voltage by adjusting the duty cycle of the switching signal. The converter may step up or decrease the input voltage, depending on the demands of the load [10-13]. The performance of buck-boost converters has recently been addressed by several control approaches, such as SMC, PID control, and second-order sliding mode control (SOSMC).

Sliding mode control is a reliable control method that performs well in tracking and disturbance rejection in the face of uncertainties and disturbances. The sliding mode controller forces the sliding variable to reach and stay on a sliding surface to guarantee that the system output follows the required reference signal [14-16]. The system is made to be insensitive to disturbances and uncertainty by the sliding surface. Several studies have suggested the use of sliding mode control for voltage regulation in the context of buck-boost converters.

For the interleaved DC-DC boost converter, [17] presents a fuzzy logic sliding mode controller. The sliding mode controller ensures resilience against all changes, and fuzzy logic is employed to eliminate the chattering problem induced by the sliding controller, which increases efficiency and lowers error, voltage, and current ripples. The suggested approach outperforms traditional sliding mode controllers when subjected to input and reference voltage fluctuations. The period of adjustment might be detrimental [18].

In another study performance and features of fuzzy based sliding mode controller is presented. It has been shown that sliding mode control is suited for boosting DC-DC conversion and offers reliable voltage management. The resultant controller/converter system can maintain the load, no matter how the input line voltage or other variables vary [19]. [20] demonstrates that DC-DC converters have a strong potential for enhancing dynamic performance with the implementation of Sliding Mode Control. DC-DC converters and other VSS converters function well with this nonlinear control scheme. SMC's key advantage over conventional linear control strategies is its resilience in the face of line, load, and parameter changes [21].

In [22], the effectiveness of sliding mode control for the regulation of DC-DC converters is compared with traditional linear control with regard to transient characteristics.

According to research, sliding mode control is better capable of delivering steady transient responses in a variety of operational scenarios. The main benefits are resilience and dependability in the presence of parameter, line, and load uncertainty.

According to [23], the general performances and characteristics of three different types of controllers for a DC-DC boost converter in continuous conduction mode are compared: the Sliding Mode (SM) controller, the PI controller, and the proportional integral derivative controller. The pulse width modulation-based sliding mode controller outperforms the PID controller in the presence of fluctuating input and load voltages. A sliding mode controller can help to reduce the nonlinearity and instability of power converters.

According to [24], second-order sliding mode control can maintain the fundamental characteristics of normal sliding mode control while eliminating chattering and ensuring smooth, or at least piecewise smooth, control. The approach also offers more accurate estimations of switching latency.

3 DC-DC Buck-Boost converter

The DC-DC buck-boost converter, shown in Figure 1, is an electronic circuit capable of either stepping up (increasing) or stepping down (decreasing) the input direct current (DC) voltage to a desired output DC voltage. This type of converter is widely used in various applications including battery-operated devices, electric vehicles, portable electronics, and power supply systems. It provides a stable output voltage, which is crucial for these systems, regardless of variations in input voltage [25]. The main structure of a buck-boost converter includes an inductor, two switches (usually MOSFETs or transistors), and two diodes. The converter operates in two distinct modes, given in following Sub-Sections.

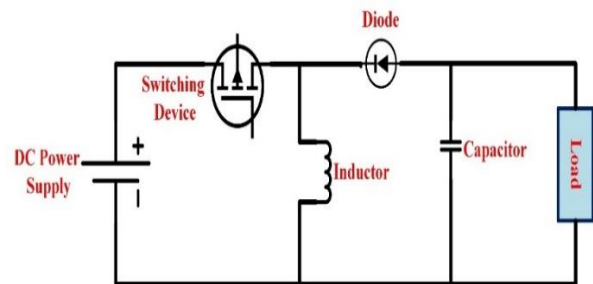


Figure 1. DC-DC Buck-Boost converter scheme [25]

3.1 Buck mode

In Buck mode operation, the converter functions as a step-down converter, decreasing the input voltage. One switch is closed (ON), and the other is open (OFF). The closed switch allows current to flow through the inductor, thereby storing energy in its magnetic field. The diode associated with the open switch is reverse-biased, which prevents current from flowing through it. When the switch is opened, the inductor's magnetic field collapses, and the energy is transferred to the output capacitor through the forward-biased diode. As a result, the output voltage is obtained lower than the input voltage in this mode.

3.2 Boost mode

In Boost mode operation, the converter functions as a step-up converter, increasing the input voltage. The roles of the switches and diodes are reversed compared to the previous mode. Current passes through the inductor when the switch is closed, storing energy in its magnetic field. Reverse-biasing the diode connected to the closed switch stops current from passing through it. When the switch is opened, the inductor's magnetic field collapses, and the stored energy triggers a voltage spike across the inductor. This voltage spike, when combined with the input voltage, results in a higher voltage across the diode. Consequently, the diode becomes forward-biased, allowing current to flow through it and charge the output capacitor.

In this mode, the output voltage is higher than the input voltage. Depending on the duty cycle, which is the ratio of the switch ON duration to the overall switching period, the converter can either run in boost or buck mode. The converter works in boost mode when the duty cycle is greater than 0.5 and in buck mode when it is less than 0.5.

Buck-boost converters offer versatility by providing both step-up and step-down functionality. However, they also come with some disadvantages, such as increased complexity compared to standalone buck or boost converters, reduced efficiency at high output currents, and the generation of Electromagnetic Interference (EMI) due to the switching action.

4 PI and Sliding Mode Control

In this Section, PI and Sliding Mode Control details are presented and evaluated.

4.1 PI control for DC-DC Buck-Boost converter

The PI controller is a popular feedback control algorithm used to regulate various processes in numerous applications. In the context of a DC-DC buck-boost converter, the PI controller can be employed to maintain a constant output voltage, even when the input voltage or load conditions change. The PI controller adjusts the duty cycle of the switching signal applied to the buck-boost converter based on the error between the desired output voltage (reference voltage) and the actual output voltage. The PI controller consists of two components: proportional (P), and integral (I), each with its respective gains (K_p and K_i) [26].

By means of a methodical tuning approach aiming at maximizing the performance of the control system. With an eye on reducing the error between the expected output and the actual system response and guaranteeing stability and resilience, these coefficients have been determined using the Ziegler-Nichols technique.

Ziegler-Nichols method offers a methodical methodology to adjust the PI controller settings. First, this approach determines the ultimate gain (K_u), that is the gain at which the system starts to oscillate with a constant amplitude. It also establishes the final period (T_u), the temporal interval of these steady oscillations. The Ziegler-Nichols approach employs certain formulae to compute the proportional (K_p), integral (K_i) gains depending on once

determined values for K_u and T_u and given in Equation (1-2).

$$K_p = 0.45 \times K_u \quad (1)$$

$$K_i = 2 \times K_p / T_u \quad (2)$$

Table 1 shows the Ziegler-Nichols parameters for tuning PI controller.

Table 1. PI and Ziegler-Nichols parameters

Parameter	Value
Ultimate Gain (K_u)	0.72
Ultimate Period (T_u)	0.05
Proportional Gain (K_p)	0.324
Integral Gain (K_i)	13

The output signal is sent to the PI controller together with the reference signal and the output real output voltages, which are measured as fed back. The rising edge pulsed output-controlled output signal is sent to the chopper, where the controlled output is obtained in the form of a duty cycle presented in Equation (3).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^T e(t) dt \quad (3)$$

Steady-state error, rising time, overshoot, settling time, and robustness are a few of the important performance factors that directed the tuning effort. The constant-state error has been reduced to guarantee that, without continuous offsets, the system output closely matched the reference signal. While the maximum overrun has been lowered to prevent too great changes in the response of the system, the rise time has been changed to balance a quick reaction with little overshoot. The settling period has been also adjusted to guarantee rapid stabilization of the system around the target value. At last, resilience has been taken into account to guarantee the controller could efficiently manage changes in system characteristics and disturbances.

4.2 Sliding mode control (SMC) for DC-DC Buck-Boost converter

Sliding Mode Control (SMC) is an advanced control technique that has been applied to various power electronics systems, including DC-DC buck-boost converters. SMC is a robust and efficient method for controlling non-linear systems with uncertainties, as it can provide a fast-transient response and high accuracy under varying conditions.

The basic idea behind SMC is to force the system's state to move along a pre-defined sliding surface in the state space, which guarantees desired system behavior. The state flows along the sliding surface to the intended equilibrium point after it reaches it. To implement SMC for a DC-DC buck-boost converter, two steps are realized, as defined in the following Sub-sections:

4.2.1 Sliding surface

In this step, sliding surface (S) that represents the desired dynamic behavior of the converter is defined. A common choice for the sliding surface in a buck-boost converter is presented in Equation (4) as follows:

$$S = (V_{out} - V_{ref}) + \lambda * (V_{out_dot}) \quad (4)$$

where V_{out} is the output voltage, V_{ref} is the reference output voltage, λ is a positive constant, and V_{out_dot} is the derivative of V_{out} with respect to time.

4.2.2 Control law

Control law forces the system state to the sliding surface and ensures that it remains there. The control law should drive the sliding surface (S) to zero. The sliding line determines the switching frequency for the SM control, which relates to the on/off shifting of the converter switch. Equation (5) are defined for the switch function.

$$S = C_1x_1 + C_2x_2 = C^T x = 0 \quad (5)$$

where, x_1 and x_2 are the state variables, and C_1 and C_2 are the coefficients that determine how these state variables combine to form the sliding surface.

Careful determination of the coefficients C_1 and C_2 of the intended Sliding Mode Control (SMC) has been done to satisfy the dynamics and control criteria of the system. These

coefficients have been chosen with consideration for system properties to guarantee that the control system achieves the intended performance. The mathematical model of the system has been first established, and the sliding surface has been defined considering the nonlinear characteristics of this model. Performance requirements including speed, stability, and system overshoot of the sliding surface are considered throughout design. These criteria allowed the coefficients C_1 and C_2 to be found, thereafter evaluated and refined iteratively in simulations. The aim of this technique has been to guarantee that the system stays stable during the steady-state and rapidly approaches the sliding surface during the transient state. The coefficients C_1 and C_2 are tuned to correspond with the dynamic characteristics and performance criteria of the system. Consequently, used to balance system performance, stability, and robustness, the values of C_1 and C_2 are 0.01 and 0.2 respectively.

The control law is implemented using a switching mechanism that toggles the control input u based on the value of the sliding surface S . The sliding surface dictates the switching frequency for the sliding mode control, which directly influences the on/off shifting of the converter switch. The switching function is described by Equation (6):

$$u = \begin{cases} 1 = ON & \text{when } S > k \\ 0 = OFF & \text{when } S < k \\ \text{previous state, otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

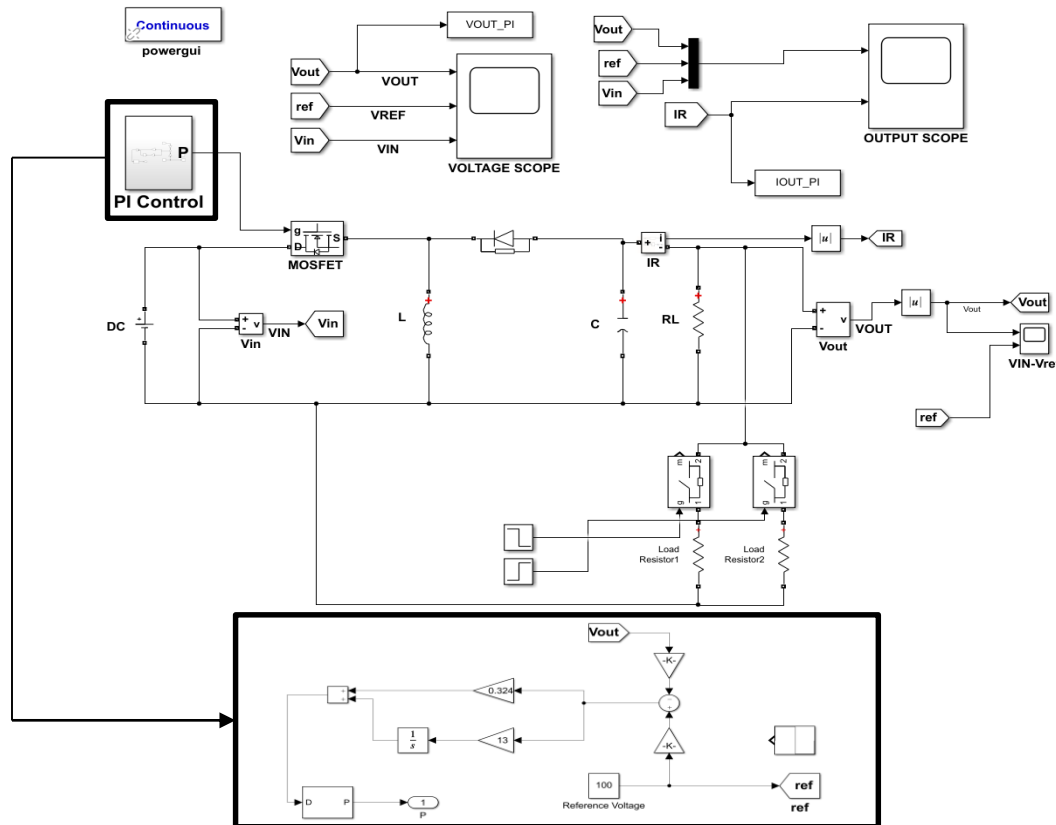


Figure 2. PI controlled Buck-Boost converter simulation scheme

where, k represents a threshold value that determines the switching boundary. When the sliding surface S exceeds k , the control input u switches to ON (1). On the other hand, the control input turns off (0) when S is less than k . Should S be near to k , the control input maintains its former condition to avoid needless switching.

The correct operation of the sliding mode controller depends on this switching technique as it guarantees that the system state stays on the sliding surface, therefore attaining the intended control goals. Table 2 shows the buck-boost system parameters.

Table 2. Buck-boost system parameters

Number	Parameter	Values
1	Input Voltage	100 V
2	Capacitance	2 mF
3	Inductance	1 μ H
4	Duty cycle	0.5
5	C_1, C_2	0.01, 0.2
6	K_p, K_i	0.324, 13

5 Results and discussions

In this paper, MATLAB/Simulink having a user-friendly graphical interface and allows for easy implementation of control algorithms is used to simulate a Buck-Boost converter with proposed control methods. In Figures 2-3 simulation scheme is given for PI and SMC respectively. The details of the proposed system parameter are presented in Table 1.

Figure 4 illustrates the comparison of output voltage variations under changes in reference voltage for both the PI controller and the SMC. Reference voltage is 100 V between

zero and two second, and is changed as 150 V between two and four second, and is applied to simulation as 50 V after four second. SMC exhibits a high-level time response without any overshoot or damping. However, the PI controller is affected by changes in the reference voltage.

The PI controller also experiences overshoot and damping when the reference voltage changes, with a slower settle-down time compared to the SMC. With changing the reference voltage in the PI and SMC and comparing depending on the output voltage, it is clearly observed that the SMC maintained a constant value while the PI responded by exceeding and a delay in returning to a steady state.

Figure 5 shows performance comparison of the output voltages under load variations for SMC and PI controller. Load is changed from 100 to 200 ohms between two and four second, for other time intervals load is 100 ohms. Therefore, output voltage is observed. SMC performs better dynamic response for load variation with desired 100 V constant output voltage.

It is noted that the decrease in current according to Ohm's law, and the SMC appears well without sparks and with smooth transition during the change in load. This refers to the system's ability to handle sudden changes without causing a sudden voltage spike or drop, which could cause a voltage drop at the output and could be ignored because of undistorted voltage and fast dynamic response. In addition, In Figure 6, the load current comparison is realized with the changing output load of the proposed PI and SMC, as stated in Figure 5. It is observed that SMC is outstanding with a faster and more stable response of output current, without overshooting or damping unlike PI control.

In Figures 4-6, it is clear that SMC is outstanding method when compared to PI control. Output voltage settle time is effectively small, and dynamic response performance is superior for reference voltage change and load change.

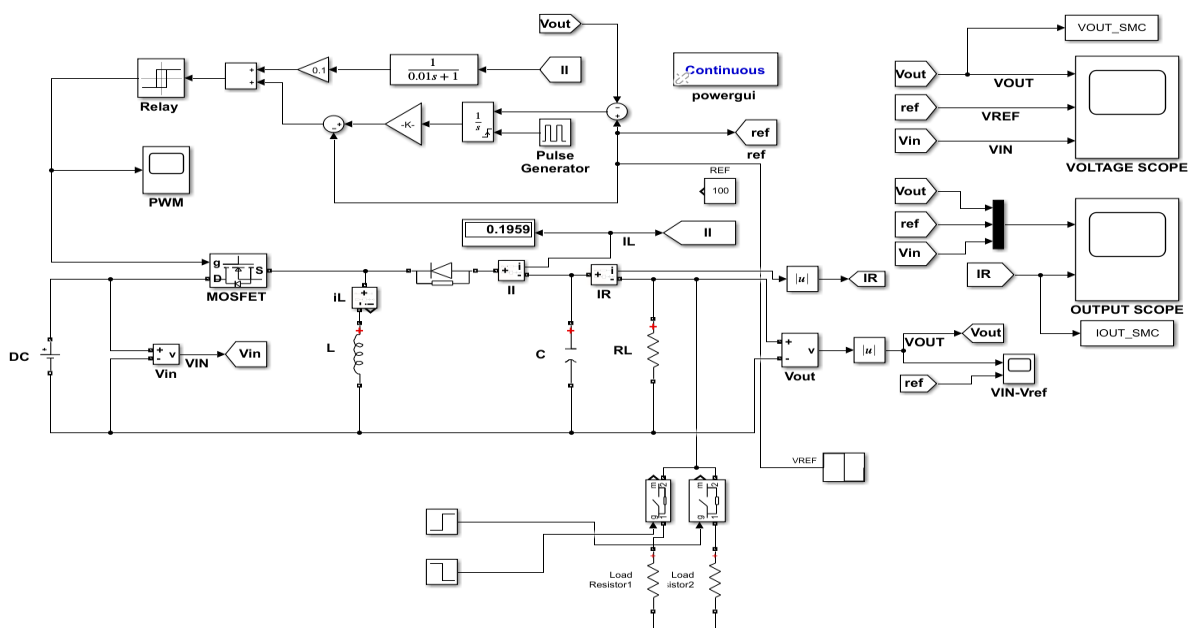


Figure 3. SMC controlled Buck-Boost converter simulation scheme

Based on many performance criteria, PI and Sliding Mode Control (SMC) performance has been evaluated. First, it has been found by evaluating the transient reaction that SMC reacts much quicker than PI control. For PI control, for example, the settling time measured at 0.06 seconds after a change in the reference voltage; SMC finished the operation in only 0.02 seconds. Regarding overshoot, SMC kept this overrun at a much lower 1% level whereas the PI control system reacted to abrupt changes in the reference voltage with a 10% overshoot. Examining the settling time, SMC shortened the duration to 0.02 seconds whereas PI control took 0.08 seconds to settle at the new reference value. Moreover, in terms of stability and robustness, SMC showed better performance during load fluctuations, displaying consistent behavior and fast recovery free from abrupt voltage dips as opposed to PI control. Though SMC needed somewhat more control effort than PI control, this effort has been tuned to provide a more consistent and quick output. While SMC regularly maintained the output voltage at 100 V, during load variation testing it has been shown that the output voltage under PI control had variations, declining from 100 V to 90 V before returning to the setpoint.

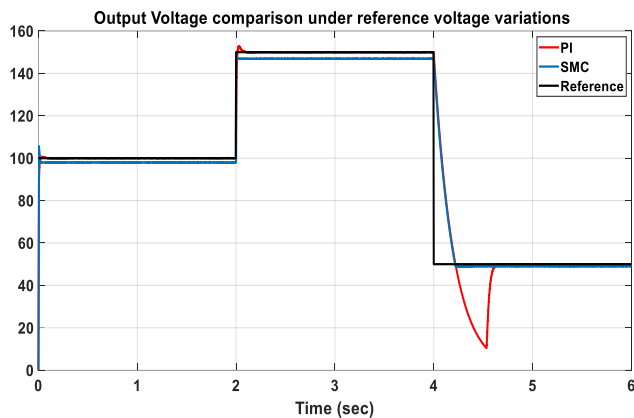


Figure 4. Output voltage comparison under reference voltage variations

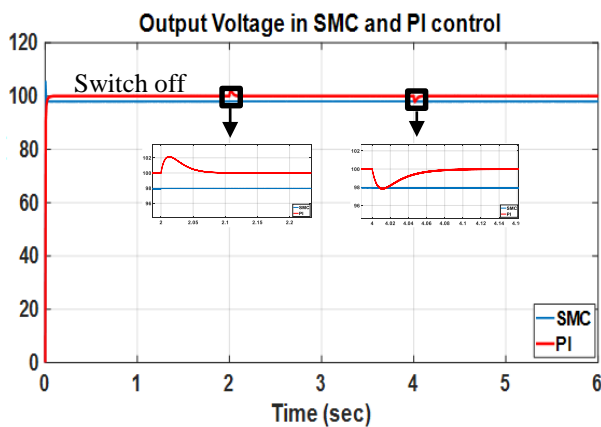


Figure 5. Output voltage comparison under load variations

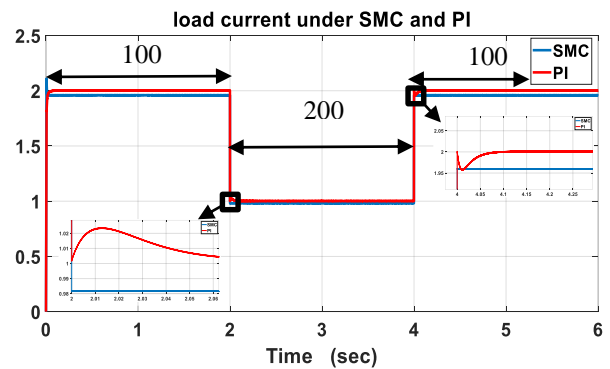


Figure 6. Load current comparison under load variations

6 Conclusions

This paper provides critical insights into the performance of PI controller and Sliding Mode Control (SMC) under varying voltage and loading conditions. The SMC have demonstrated remarkable adaptability and robustness, effectively handling voltage transients and load variations. Even amid dynamic load changes, the SMC have managed to maintain consistent output without any electrical disturbances, attesting to its superiority in ensuring system stability. The comparative analysis further emphasizes the superior performance of the SMC over the PI controller. Despite the PI controller being effective in certain scenarios, some limitations such as overshoot during reference voltage alterations and slower settling time have been observed. On the other hand, the SMC have displayed a heightened time response and robustness against reference voltage changes, making it an optimal choice in scenarios with dynamic load changes. Given these findings, the study strongly recommends adopting the SMC over the PI controller, particularly in systems facing frequent voltage and load fluctuations, thanks to its superior performance and adaptability. While both the PI controller and SMC have the potential for further improvement, the SMC's effectiveness in managing voltage and load changes have outperforms and provides valuable insights for the design and operation of Buck-Boost converter under diverse conditions.

Conflict of interest

The authors affirm that none of their known financial conflicts of interest or personal connections could have appeared to impact the research presented in this study.

Similarity rate (iThenticate): 19 %

References

- [1] P. Azer and A. Emadi, Generalized state space average model for multi-phase interleaved Buck, Boost and Buck-Boost DC-DC converters: transient, steady-state and switching dynamics. *IEEE Access*, 8, pp. 77735-77745, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2987277>.

- [2] N. Rana, S. Banerjee, S. K. Giri, A. Trivedi and S. S. Williamson, Modeling, analysis and implementation of an improved interleaved Buck-Boost converter. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 68 (7), pp. 2588-2592, 2021 <https://doi.org/10.1109/TCSII.2021.3056478>.
- [3] M. J. Mnati, D. V. Bozalakov and A. Van den Bossche, New pulse width modulation technique to reduce losses for three-phase photovoltaic inverters. *Act. Pass. Electron. Compon.*, 2018, pp. 1-10, 2018 <https://doi.org/10.1155/2018/4157614>
- [4] D. V. Bozalakov, J. Laveyne, M. J. Mnati, J. D. de Vyver and L. Vandeveldel, Possible power quality ancillary services in low-voltage grids provided by the three-phase damping control strategy. *Applied Science*, 10 (21), pp. 7876, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10217876>
- [5] Z. Uysal and A. Karaarslan, Comparison of one cycle and PI control method using Buck-boost converter. In: *Proc. 13th Int Conf Technical Physical Problem of Electrical Engineering*, 22, pp. 115-120, 2017.
- [6] S. K. Pandey, S. L. Patil and S. B. Phadke, Regulation of nonminimum phase DC-DC converters using integral sliding mode control combined with a disturbance observer. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 65, no. 11, pp. 1649-1653, 2018. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2017.2759908>
- [7] Y. Wang, W. Zhang and C. Xue, Adaptive continuous sliding mode control of Buck converters with multidisturbances based on zero-crossing detection. *IEEE Access*, 10, pp. 72643-72657, 2022. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3188760>
- [8] S. W. Seo and H. H. Choi, Digital implementation of fractional order PID-type controller for Boost DC-DC converter. *IEEE Access*, 7, pp. 142652-142662, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2945065>
- [9] H. H. Park and G. H. Cho, A DC-DC converter for a fully integrated PID compensator with a single capacitor. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 61 (8), pp. 629-633, 2014. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2014.2327351>
- [10] M. J. Mnati, D. V. Bozalakov, and A. van den Bossche, A new synchronization technique of a three-phase grid tied inverter for photovoltaic applications. *Mathematical Problems in Engineering*, pp. 1-13, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/7852642>
- [11] S. C. Tan, Y. M. Lai and C. K. Tse, Indirect sliding mode control of power converters via double integral sliding surface. *IEEE Trans. on Power Electronics*, 23 (2), pp. 600-611, 2008. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2007.915624>
- [12] S. C. Tan, Y. M. Lai, C.K. Tse and M. K. H. Cheung, Adaptive feedforward and feedback control schemes for sliding mode controlled power converters. *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 21, no. 1, pp. 182-192, 2006. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2005.861191>
- [13] S. C. Tan, Y. M. Lai and C. K. Tse, General design issues of sliding-mode controllers in DC-DC converters. *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 55 (3), pp. 1160-1174, Mar. 2008. <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.909058>
- [14] E. Vidal-Idiarte, A. Marcos-Pastor, R. Giral, J. Calvente and L. Martinez-Salamero, Direct digital design of a sliding mode-based control of a PWM synchronous buck converter. *IET Power Electronics*, 10 (13), pp. 1714-1720, 2017. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2016.0975>
- [15] R. K. Subroto, L. Ardhenta and E. Maulana, A novel of adaptive sliding mode controller with observer for DC/DC boost converters in photovoltaic system. in *Proc. of 5th International Conference on Electrical, Electronics and Information Engineering*, Malang, Indonesia, pp. 9-14, 2017. <https://doi.org/10.1109/ICEEIE.2017.8328754>
- [16] N. I. P. de León Puig, D. Bozalakov, L. Acho, L. Vandeveldel and J. Rodellar, An adaptive-predictive control scheme with dynamic hysteresis modulation applied to a DC-DC buck converter. *ISA Transactions*, 105 (1), pp. 240-255, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.05.015>
- [17] S. Benzaouia, N. K.M'Sirdi, A. Rabhi and S. Zouggar, Signed-Distance fuzzy-logic Sliding-Mode control strategy for floating interleaved Boost converter. 2021 9th International Conference on Systems and Control (ICSC), Caen, France, pp. 417-422, 2021. <https://doi.org/10.1109/ICSC50472.2021.9666701>
- [18] Md. S. Ul-Alam, M. Quamruzzaman and K. M. Rahman, Fuzzy logic based sliding mode-controlled dc-dc boost converter. in *International Conference on Electrical & Computer Engineering (ICECE 2010)*, Dhaka, Bangladesh, pp. 70-73 2010. <https://doi.org/10.1109/ICELCE.2010.5700555>
- [19] Z. B. Duranay, H. Guldemir and S. Tuncer, Fuzzy sliding mode control of DC-DC Boost converter. *Engineering Technology & Applied Science Research*, 8 (3), pp. 3054-3059, 2018. <https://doi.org/10.48084/etasr.2116>
- [20] B. M. David and S. K. K. Sreeja, A Review of sliding mode control of DC-DC converters. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2, pp. 1382-1386, 2015.
- [21] S. C. Tan, Y. M. Lai and C. K. Tse, General design issues of sliding-mode controllers in dc-dc converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55, pp. 1160-1174, 2008. <http://doi.org/10.1109/TIE.2007.909058>
- [22] S. Dhali, P. Rao, P. Mande and K. Rao, PWM-based sliding mode controller for DC-DC boost converter. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2, pp. 618-623, 2012.
- [23] M. K. Khan, Design and application of second order sliding mode control algorithms. Ph.D. dissertation, Dept. Eng., University of Leicester, Leicester, U.K., 2003.
- [24] M. Deshmukh, A constant frequency second order sliding mode controller for buck converter. 2017 Second International Conference on Electrical,

- Computer and Communication Technologies (ICECCT), Coimbatore, India, pp. 1-5, 2017. <http://doi.org/10.1109/ICECCT.2017.8118001>
- [25] M. Z. Zulkifli, M. Azri, A. Alias, N. Talib and J. M. Lazi, Simple control scheme buck-boost DC-DC converter for stand alone PV application system. International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS), vol. 10, no. 2, pp. 1090-1101, 2019. <http://doi.org/10.11591/ijpeds.v10.i2.pp1090-1101>
- [26] A. S. T. Hussain, F. H. Taha, H. A. Fadhil, S. Q. Salih and T. A. Taha, Designing an optimal PID controller for a PV-connected Zeta converter using genetic algorithm. International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS), 15 (2), pp. 566-576, 2024. <http://doi.org/10.11591/ijpeds.v15.i1.pp566-576>





Comparative analysis of different LED lamps with reference to EU's ecodesign and energy labeling regulations in Türkiye

Türkiye'deki farklı LED lambalarının AB'nin eko tasarım ve enerji etiketleme düzenlemeleri bağlamında karşılaştırmalı analizi

Zühal Polat^{1,*} , Haydar Bayar² , Erkan Dursun³ 

¹ Marmara University, Department of Electrical and Energy, 34865, İstanbul, Türkiye

² Yıldız Technical University, Department of Marine Engineering, 34349, İstanbul, Türkiye

³ Marmara University, Department of Electrical and Electronics Engineering, 34854, İstanbul, Türkiye

Abstract

The lighting industry, which was unaffected by the economic downturn triggered by the COVID-19 pandemic, recorded a growth of 2.5% in 2020. The global lighting market, valued at approximately 118.33 billion USD in 2019, is expected to reach 163.72 billion USD by 2027. In Turkey's imports of electric lighting devices, China leads with a 49% share, while EU countries such as Germany, Romania, Italy, the Czech Republic, France, and Poland are also significant import partners. As a candidate country for the EU, Turkey must align its products, particularly solid-state lighting equipment, with EU regulations. This study was prepared using LED lamps from ten different brands, both domestic and imported, available in the Turkish market. The lamps were tested under the Energy Labeling Regulation (EU) 2019/2015 and photometric analyses were conducted. The results indicate that all LED lamps fall into the 'F' and 'G' energy classes under the new labeling rules. Although the sample size is limited, this study highlights the need to improve the efficiency of LED lamps in Turkey while technically complying with the new energy labeling regulations, and provides a reference for manufacturers aiming to enter the Turkish and EU LED markets.

Keywords: Efficiency label, Energy efficiency, EU Regulations, LED manufacturers

1 Introduction

Artificial light energy consumption is approximately 2,900 TWh, corresponding to 16.5% of the world's annual electricity production [1]. This consumption causes 5% of global greenhouse gas emissions. However, increasing population and urbanization are expected to lead to a 50 percent increase in artificial lighting demand by 2030 [2]. In 2020, approximately 219 billion kilowatt-hours (kWh) of electricity were used to light the residential and commercial sectors together in the U.S. It has been stated that this value constitutes approximately 6% of the total U.S electricity consumption. The development of Solid-State Lighting

Öz

COVID-19 salgınının tetiklediği ekonomik durgunluktan etkilenmeyen aydınlatma endüstrisi, 2020 yılında %2,5 oranında bir büyüme kaydetmiştir. 2019 yılında yaklaşık 118.33 milyar ABD doları değerinde olan küresel aydınlatma pazarının, 2027 yılında 163.72 milyar ABD dolarına ulaşması beklenmektedir. Türkiye'nin elektrikli aydınlatma cihazları ithalatında Çin %49'luk bir payla başı çekerken, Almanya, Romanya, İtalya, Çek Cumhuriyeti, Fransa ve Polonya gibi Avrupa Birliği (AB) ülkeleri de önemli ithalat ortakları arasındadır. AB adayı bir ülke olarak Türkiye, özellikle katı hal aydınlatma ekipmanları için ürünlerini AB düzenlemeleriyle uyumlu hale getirmek durumundadır. Bu çalışma, Türkiye pazarında satışta olan yerli üretim ve ithal toplam on farklı markanın LED lambaları kullanılarak hazırlanmıştır. Lambalar, Enerji Etiketleme Yönetmeliği (AB) 2019/2015 kapsamında test edilmiş ve fotometrik analizler yapılmıştır. Sonuçta, tüm LED lambaların yeni etiket kuralları altında "F" ve "G" enerji sınıflarına girdiğini göstermiştir. Bu çalışma, her ne kadar örneklem büyüklüğü sınırlı olsa da, Türkiye'deki LED lambaların yeni enerji etiketleme düzenlemelerine teknik olarak uyum sağlamakla birlikte verimliliklerinin artırılması gerekliliğini ortaya koymakta ve Türk ve AB LED pazarına girmeyi hedefleyen üreticiler için bir referans oluşturmaktadır.

Anahtar kelimeler: Verimlilik etiketi, Enerji verimliliği, AB Yönetmelikleri, LED üreticileri

(SSL) technologies based on components such as LEDs, Organic light-emitting diodes (OLEDs), and Laser Diodes (LDs) instead of traditional lighting methods is of great importance in terms of energy efficiency, greenhouse gas emissions, and energy sustainability. Studies show that phasing out traditional lighting technologies by 2025 will prevent more than 15.2 million tons of carbon emissions [3]. Estimates by the United Nations Environment Program (UNEP)-Global Environment Facility (GEF) estimate that switching to efficient lighting in the Association of Southeast Asian Nations (ASEAN) could result in annual electricity savings of over US\$3.5 billion. Thus, electricity

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: zuhalpolat@marmara.edu.tr (Z. Polat)

Geliş / Recieved: 27.06.2024 Kabul / Accepted: 14.09.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1505752

consumption is expected to decrease by 35 TWh, while CO₂ emissions are expected to decrease by 20 million tons [4].

In 2020, Europe utilized nearly 11 billion lamps, equating to over 24 lamps per citizen in the EU27. Projections for 2030 estimate that the residential sector in the EU will see the installation of 6.4 billion lamps, equating to 32 lamps per hour, with an annual electricity consumption of 27 TWh. It is anticipated that over 96% of the lamps installed in 2030 will be LED lights [5].

LED technology continues to evolve with increasing Luminous Efficacy and price-performance ratio while providing new opportunities for lighting design and energy savings [6, 7]. Figure 1 shows that while LED costs continue to fall, indoor LED lamp usage is advancing, and LED sales figures exceed fluorescent lamp sales figures. LED lamp sales had a 3.7% market share in the lighting market in 2013, which accounted for almost half of the total global lighting sales in 2019. LED lamps and equipment are expected to account for more than 90% of lighting product sales by 2030 [1]. The economic recession caused by the novel coronavirus contagious disease (COVID-19) could not prevent the LED market's growth rate of 2.5% in 2020, worth approximately \$15.7 billion [8].

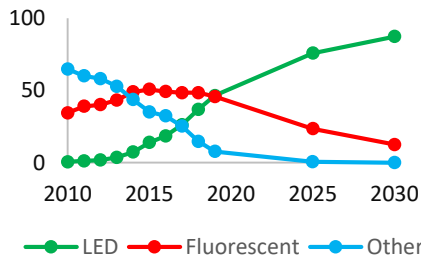


Figure 1. Global LED penetration rate by sales

The U.S. Department of Energy's (DOE) energy savings forecast for solid-state lighting in general illumination applications predicts that, by 2035, LED lighting will constitute 84% of total lighting sales, resulting in annual primary energy savings of 4.8 quadrillion British thermal units (BTU) [9]. Considering all these effects, the European Union has created new legal regulations that will phase out tungsten halogen and compact fluorescent lamps. It is expected to convert existing 1.3 billion conventional light sources to LED, allowing the EU to avoid approximately 100 million tons of CO₂ emissions. Thus, it is aimed to save 270TWh of electricity. The EU lighting market, which was 16.3 billion Euros in 2012, reached an average of 19.8 billion Euros in 2020. This market will be estimated to exceed 30 billion euros by 2024 [10, 11].

Furthermore, governments are offering support and incentives to encourage consumer adoption of LED products. This involves implementing regulations to phase out older and less efficient lighting technologies, along with initiatives aimed at enhancing the overall efficiency of the lighting industry [1].

The first law guiding energy efficiency policies in Türkiye, an EU candidate country, is the Energy Efficiency

Law No. 5627, which entered into force in 2007. This law aims to alleviate the burden of energy costs on the economy, to use energy effectively, to prevent waste, and to protect the environment [12]. In addition, many regulations, including targets related to the use of solid-state technologies in lighting energy systems, are being issued and tried to be put into practice. In the "Regulation on Increasing Efficiency in the Use of Energy Resources and Energy" published in the Official Gazette dated 27.10.2011, the necessity of using LED lamps in outdoor lighting systems such as roads, parks, and gardens is stated. According to the action code, SA-02/SH-01/E-01 of the Energy Efficiency Strategy Document covering the years 2012-2023, published on 20/2/2012, the maximum annual energy demand for lighting in new buildings will be determined. The energy resources that will meet this energy demand will be efficient and clean, the amount of CO₂ emissions released into the atmosphere will be determined, and new building constructions exceeding the limit values will not be allowed [12]. An action named "Increasing Energy Efficiency in General Lighting" in the National Energy Efficiency Action Plan (NEEAP) was introduced in March 2018, which stated that the fixtures used in general lighting should be replaced with efficient fixtures. In addition, the necessity of converting sodium vapor luminaires to LED luminaires and evaluating them in terms of benefit/cost, time, and efficiency has been demonstrated [12, 13].

Regulation (EU) No 874/2012 was repealed and replaced by the Energy Labeling Regulation (EU) 2019/2015. Following rescaling of the EU energy label for lighting products in September 2021, the new labels use a scale from A (most efficient) to G (least efficient). Existing stocks with the old label will continue to be sold until March 1, 2023. Eco-design rules are mandatory for all manufacturers and importers who want to sell their lighting products in the EU. With the use of more efficient lighting products in Europe, up to 34 TWh of electricity will be saved until 2030. Thus, approximately 7 million tons of CO₂ emissions will be prevented every year [14, 15]. Lighting equipment and LED lamps produced in Türkiye and entering the EU market must have passed the necessary tests under the specified regulations. The aim of this paper is to examine the EU eco-design directives specifically for lighting and to test whether LED lamps of different brands and models sold in the Turkish market are suitable for eco-design procedures. LED lamps were tested and photometric analyses were performed according to (EU) 2019/2015 Energy Labelling Regulation. The photometric values obtained as a result of the analyses were used in the energy efficiency equations specified in the Eco-design Directive and the results were compared. The study is divided into five sections. The second part discusses the situation of the LED market in Turkey. The third section explains the Eco-design Directive and energy labelling. The methods used in the study according to the energy efficiency directives are explained in the fourth section. The fifth section describes the test setup and procedures. The sixth section compares the test results. The last section presents the results and future implications.

2 LED market status in Türkiye

The manufacturing industry produces six main groups of lighting products. The first group includes lamps, which serve as light sources. The second group comprises monoblock headlamps, lighting equipment, and visual signaling equipment designed for vehicles. The third group encompasses luminaires, electrical parts, side parts, lampshades, chandeliers, sconces, spots, and projectors. The fourth group focuses on street lighting equipment. The fifth group involves portable electric lamps, torches, gas lamps, and electronic components. Lastly, the sixth group pertains to billboards and signaling equipment. Table 1 illustrates the top 10 countries from which Turkey imports LED lamps, with up to 96% of these lamps being imported from China [16].

Table 1. LED lamp imports by country [16]

Top	Country	Number	Dollars (US)	Dollars/Number
	Total	59,719,481	49,935,124	0.84
1	China	58,100,933	48,075,755	0.83
2	Egypt	1,112,856	538,249	0.48
3	Germany	257,609	311,779	1.21
4	Bulgaria	94,036	302,443	3.22
5	Japan	53,525	258,899	4.84
6	United Kingdom	4,689	80,359	17.14
7	Hungary	26,042	61,229	2.35
8	Taiwan	15,180	56,287	3.71
9	Italy	27,312	53,335	1.95
10	Holland	2,074	43,533	20.99

Table 2 shows the lamp export data in Türkiye between 2013-2018. Hot cathode fluorescents and other filament lamps are the most exported lamps. Although there has been a decrease in the annual total number of exports, it is observed that the number of lamps and equipment exported increased slightly in 2018. The export of LED lamps has been increasing since 2017. While the number of entrepreneurs in the electrical Lighting equipment manufacturing industry in Türkiye was 1,849 in 2010, this number reached 4,375 in 2018. While the production value

Table 2. Lamp exports in Türkiye (US Dollars)[16]

Name of the product	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Monoblock headlight units	817,446	537,577	565,329	624,085	523,654	517,757
Halogen lamps with tungsten filament	2,868,458	3,294,888	2,072,060	1,686,158	1,720,516	2,052,749
Filament lamps (power<200W, voltage>100V)	7,113,580	6,212,665	4,485,830	2,891,092	1,821,719	1,755,412
Other lamps with filament	3,758,052	3,830,444	3,056,277	3,247,634	3,102,948	3,274,078
Hot cathode fluorescents	9,122,524	7,260,516	8,124,578	5,386,859	4,999,754	5,257,556
Mercury and sodium vapor lamps	4,705,502	4,666,773	4,900,478	4,057,118	2,764,805	2,070,711
Other discharge lamps (except ultraviolet lamps)	1,312,915	988,499	742,566	1,054,527	546,265	677,278
Arc lamps	93,008	79,892	140,313	131,713	146,884	125,701
Violet and infrared ray lamps	1,613,257	1,387,856	639,961	452,036	346,883	370,590
LED lamps					2,097,371	3,211,960
Lamp Total	31,404,742	28,259,110	24,727,392	19,531,222	18,070,799	19,313,792
Parts of glow, discharge-based electric bulbs and arc lamps	1,341,102	2,228,426	1,601,044	1,785,260	1,156,124	598,104
Lamp and Parts Total	32,745,844	30,487,536	26,328,436	21,316,482	19,226,923	19,911,896

was 1.46 billion TL in 2010, it reached 6.45 billion TL in 2018.

3 The EU Eco-design and energy labeling

The 2012 EU Energy Efficiency Directive promoted energy efficiency for a 20% reduction in primary energy consumption by 2020. The EU commission amended the Energy Efficiency Directive by updating its policy framework in 2018. According to this change, an energy efficiency target of at least 32.5% was determined for 2030. EU countries will each need to deliver 0.8% new energy savings for the 2021-2030 period to achieve this target. In addition, the regulations regarding the energy efficiency and environmental requirements of energy-related products entering the EU market have been determined with The EU Eco-design and Energy Labeling Directives. In 2020, the non-residential sector accounted for roughly 85% of the total electricity used for lighting. Within this sector, 53% of the consumption came from linear fluorescent lamps, 16% from high-intensity discharge lamps, and the remaining 16% from compact fluorescent lamps, halogen lamps, and LEDs. Major consumers included offices (20%), stores (15%), production areas (15%), road lighting (14%), and circulation areas such as halls, corridors, and stairs in buildings (10%). Despite a 65% increase in the installation of light sources from 2005 to 2020, electricity consumption only rose by 33%. The primary factor behind this lower electricity consumption relative to the number of installed light sources is the Eco-design Directive. Moreover, it is expected that the electricity consumption attributed to light sources will decrease by 5% in 2030 compared to 2020, primarily driven by the surge in sales of LED products. The eco-design approach strives to minimize the environmental impact of products throughout their entire life cycle.

In 2005, the Commission introduced the Eco-design Directive (2005/32/EC), establishing the initial framework. This marked a pivotal moment in the EU's Integrated Product Policy (IPP), aiming to diminish the environmental footprint of products. The Eco-design Directive, initially shaped by the demands of the consumer market, represented a supply-side instrument.

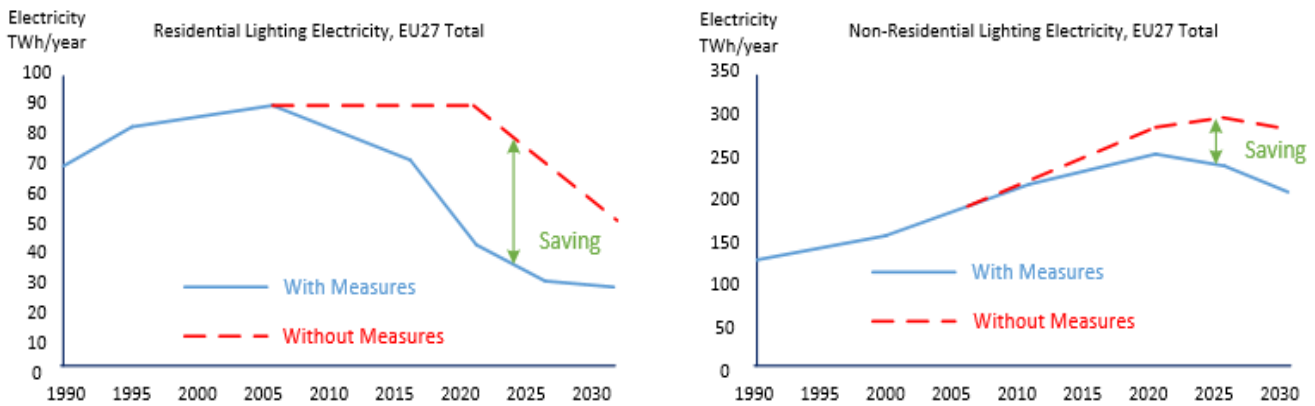


Figure 2. The annual distribution of electricity consumption for lighting in residential and non-residential areas [5]

Nevertheless, this directive's scope only addressed 31-36% of the environmental impacts of the encompassed products. It was later replaced by Framework Directive 2009/125/EC to broaden the scope to all items potentially affecting energy consumption. The Directive underwent a revision in 2020, encompassing a majority of products with the highest energy-saving potential. The selection process relied on robust and transparent methodologies to achieve optimal impact. The eco-design framework outlines general rules and conditions but does not specify product requirements. The methodology for establishing minimum requirements under the Eco-design Directive has undergone significant enhancements compared to previous directives [17]. The Eco-design Directive has established performance criteria that manufacturers must meet to place their products on the market legally. The directive covers all energy-using products sold in the commercial and industrial sectors. Energy labels, on the other hand, inform consumers about the electrical appliance's energy efficiency and electricity consumption. Thus, consumers can easily compare products with different characteristics and make a conscious purchase decision [16, 18, 19]. Lighting products are subject to EU energy labeling and eco-design requirements. According to the old regulation (EU) 874/2012, lighting products are rated from A++ (most efficient) to E (least efficient). According to the (EU) 2019/2015 new energy labeling regulation, effective from 1 September 2021, light sources are rated from A (most efficient) to G (least efficient). The sale of lighting products manufactured and labeled according to the old regulation will continue until September 1, 2023. The sale of existing stocks will not be allowed after the 2-year transition period. The EU Eco-design and Energy Labeling Directives set minimum energy efficiency standards, lamp life, and other requirements such as warm-up time, as well as encouraging the replacement of filament and halogen bulbs with more efficient lighting technologies such as LED bulbs [20].

The distribution of electricity used for lighting in the residential and non-residential areas by year is shown in Fig.2. Directives such as Eco-design and Energy Labelling, and the measures to be taken to implement them, have the

potential to save an average of 50 TWh per year of electrical energy used for lighting.

4 Material and methods

All calculations used in this study were made by the requirements of the EU 2019/2015 regulation published in the Official Journal of the European Union and entered into force on 1 September 2021. First, energy efficiency calculations of ten LED lamps of different brands sold in the domestic market were made according to the 874/2012 and 2019/2015 directives. As a result of the calculations, it has been revealed whether the LED lamps comply with the new directive.

4.1 Energy efficiency requirements according to (EU) 874/2012 directive

Following the guidelines set by European Union (EU) standard 874/2012, the Energy Efficiency Index (EEI) of a model is determined by comparing its wattage, adjusted for any losses attributed to control gear, with its reference wattage. The reference power is derived from the useful luminous flux, encompassing the total flux for non-directional lamps and the flux within a 90° or 120° cone for directional lamps.

The EEI is calculated as follows:

$$EEI = \frac{P_{cor}}{P_{ref}} \quad (1)$$

$$P_{ref} = 0,88\sqrt{\Phi} + 0,049\phi \quad (2)$$

$$\%E = 100(1 - EEI) \quad (3)$$

P_{cor} : nominal power (W); P_{ref} : reference power (W); Φ : total luminous flux (lm); E : % energy-saving

The energy efficiency class of lamps shall be determined on the basis of their as set out in Table 3. According to this table, the energy efficiency class of LED lamps is determined according to the energy efficiency index (EEI) value for non-directional lamps [21].

Table 3. (EU) 874/2012 Energy efficiency classes for lamps

Energy efficiency class	Energy efficiency index (EEI) for non-directional lamps	Energy efficiency index (EEI) for directional lamps
A++ (most efficient)	$EEI \leq 0.11$	$EEI \leq 0.13$
A+	$0.11 < EEI \leq 0.17$	$0.13 < EEI \leq 0.18$
A	$0.17 < EEI \leq 0.24$	$0.18 < EEI \leq 0.40$
B	$0.24 < EEI \leq 0.60$	$0.40 < EEI \leq 0.95$
C	$0.60 < EEI \leq 0.80$	$0.95 < EEI \leq 1.20$
D	$0.80 < EEI \leq 0.95$	$1.20 < EEI \leq 1.75$
E (least efficient)	$EEI > 0.95$	$EEI > 1.75$

4.2 Energy efficiency requirements according to the (EU) 2019/2015 directive

According to the (EU) 2019/2015 European Union standard, the useful luminous flux (lm) declared by the manufacturer and the power consumption values in operation should be known for calculating the total network efficiency of the lamps. For this, parameters such as declared power and useful luminous flux of LED lamps are measured, and the total network efficiency (η_{TM}) is calculated with Equation (4).

$$\eta_{TM} = \left(\frac{\phi_{use}}{P_{on}} \right) \cdot F_{TM} \quad (4)$$

ϕ_{use} : useful luminous flux (lm); P_{on} : declared on-mode power consumption (W); F_{TM} : efficiency factor

The efficiency factor (F_{TM}) is found from Table 4 according to the type of light source. Since LED lamps are in the group of non-directional lamps, the efficiency factor value is determined as "1" from the Table 4.

Table 4. Efficiency factor (F_{TM})

Light source type	Factor F_{TM}
Non-directional (NDLS) operating on mains (MLS)	1.000
Non-directional (NDLS) not operating on mains (NMLS)	0.926
Directional (DLS) operating on mains MLS	1.176
Directional (DLS) not operating on mains (NMLS)	1.089

According to the calculated total mains efficacy (η_{TM}), the energy efficiency class of the lamp is determined according to Table 5.

Table 5. (EU) 2019/2015 Energy efficiency classes of light sources

Energy efficiency class	Total mains efficacy η_{TM} (lm/W)
A	$210 \leq \eta_{TM}$
B	$185 \leq \eta_{TM} < 210$
C	$160 \leq \eta_{TM} < 185$
D	$135 \leq \eta_{TM} < 160$
E	$110 \leq \eta_{TM} < 135$
F	$85 \leq \eta_{TM} < 110$
G	$\eta_{TM} < 85$

4.3 Test setup and procedure

In order to measure the photometric and electrical performance of commercially produced LEDs, such as energy efficiency, total luminous flux, luminous efficiency, color temperature, and wavelength (spectral region), some tests are applied to LEDs. One of them is laboratory equipment called "Integrating Sphere" or "Ulbricht Sphere," which is usually used for non-directional light sources. It is used to characterize various light sources, including integrated spheres, LEDs, and SSL products. LED's quality should be tested by checking its photometric, colorimetric and electrical parameters. According to CIE 177, CIE84, CIE-13.3, IES LM-79-19, Optical-Engineering-49-3-033602, COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) 2019/2015, IESNA LM-63-2 and ANSI-C78.377, it recommends to using an array spectroradiometer with an integrating sphere to test SSL products.

As a result of the measurement made with the Ulbricht Sphere, some of the parameters of the light source are:

- Luminous flux (lumen)
- Power (W)
- Total mains efficacy (lm/W)
- Correlated colour temperature (CCT) (K)
- Colour rendering index (CRI)
- Dominant wavelength (nm)
- Chromaticity coordinates (x,y)
- Power factor
- Energy efficiency classes

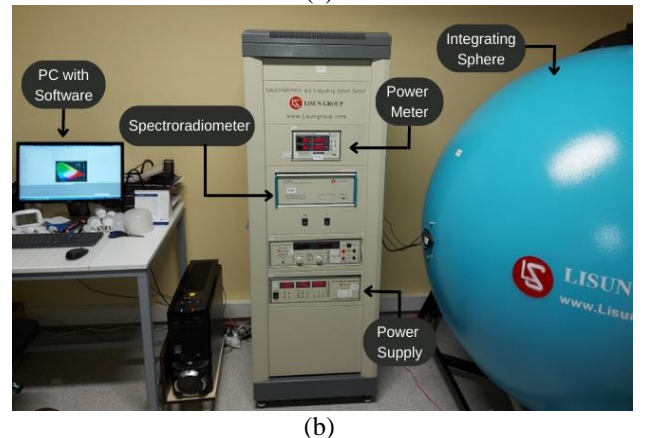
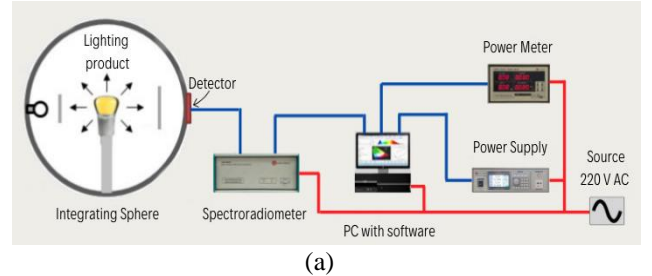


Figure 3. Test set-up block diagram (a), Test set-up built-in assembly (b)

High precision spectroradiometer (High Precision Spectroradiometer), Integrating Sphere System (LMS-9000), power analyzer, adjustable AC/DC power supply and

computer were used in these measurements. The measuring setup is shown in Fig. 3. All photometric and electrical tests of the LED lamps used in the study were carried out in accordance with European Union standards with the LISUN brand LMS-9000B -Spectroradiometer Integrating Sphere System.

All photometric and electrical tests of LED lamps are made with the measurement setup prepared above. The test result report is issued by following the test procedures below.

The steps of the test procedure are as follows:

- The computer containing all electrical components and the program that will control the system is turned on (On),
- The program to control the system is run,
- The power supply is adjusted to the voltage value suitable for the operating requirement of the light source,
- The light source is placed inside the sphere using an apparatus suitable for its physical connection,
- The light source is energized and continuously for at least 30 minutes. is operated as a preheat throughout,
- At the end of the preheating period, the measurement is taken with the computer program,

- A report is obtained from the computer program with the parameters selected according to the test purpose. (Ambient temperature should be 25°C (±0.5°C) and relative humidity 60% (±2) during the entire test period.)

An example test result report is shown in Figure 4.

The following values are obtained as a result of the light source test report:

Colorimetric- Chromaticity coordinates, CCT, Color Ratio, Peak Wavelength, Half Bandwidth, Dominant Wavelength, Color Purity, CRI, CQS, TM-30 (Rf, Rg), Spectrum Test.

Photometric- Luminous Flux, Luminous Efficiency, Radiant Power, EEI, Energy Efficiency Class, Pupil Flux, Pupil Flux Efficiency, Pupil Factor, Cirtopic Flux, Plant Growth Lamp PAR and PPF.

Electrical- Voltage, Current, Power, Power Factor, Displacement Factor, Harmonic

LED optical maintenance test- Flux VS time, CCT VS time, CRI VS time, Power VS time, Power Factor VS time, Current VS time and Flux Efficiency VS time.

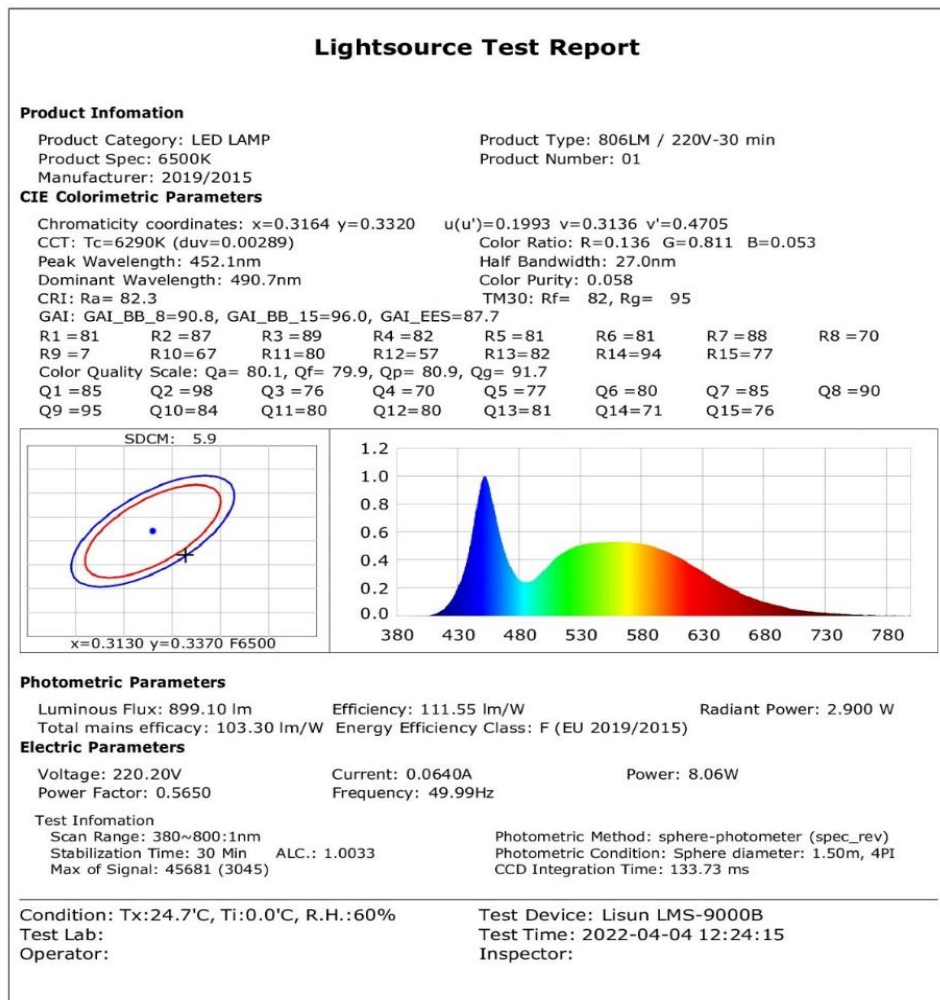


Figure 4. Test result example

Table 6. Declared vs. measured photometric and electrical parameters of the selected LED lamps

Product Code	DECLARED VALUES				SPHERE-PHOTOMETER MEASUREMENT					
	P_{on} (W)	Luminous Flux [ϕ] (lm)	Correlated Color Temperature (CCT) (K)	P_{cor} (W)	Luminous Flux [ϕ] (lm)	Correlated Color Temperature (CCT) (K)	Voltage (V)	Current (A)	Power Factor	Total mains efficacy (η_{TM}) (lm/W)
A Brand	5	400	6500	5.04	402	6534	220.1	0.044	0.513	79.79
B Brand	6.5	525	3000	5.61	533	2949	220.1	0.047	0.538	94.91
C Brand	7	780	6500	6.41	431	6574	220.1	0.06	0.48	67.26
D Brand	7	630	6500	4.84	234	6008	220.1	0.023	0.929	48.3
E Brand	5	300	6500	4.77	274	3077	220.1	0.045	0.476	57.46
F Brand	5	350	6400	3.94	272	6322	220.1	0.034	0.526	68.94
G Brand	8	640	6500	5.71	319	6840	220.1	0.027	0.941	55.89
H Brand	8.5	806	6500	8.09	864	6564	220.1	0.065	0.558	106.82
I Brand	9	840	6500	8.31	876	6308	220.1	0.065	0.58	105.43
J Brand	9.5	820	6400	8.45	795	6216	220.1	0.07	0.541	94.03

5 Results and discussion

The photometric and electrical parameters obtained from the measurements made for ten different brands and models of LED lamps are shown in Table 6. The names of LED lamp manufacturers are reserved for commercial and legal reasons.

The test and analysis results performed according to the EU 874/2012 and EU 2019/2015 regulations are shown in Table 7.

According to the test and analysis results, it has been seen that an LED lamp with energy efficiency class A+ has F or G class energy efficiency in the new classification. According to the test results, the declared values of some LEDs significantly differ from the measurements. The reason for the inconsistency in these LEDs, which are generally considered as low-cost imported brands, should be thoroughly investigated to determine whether it stems from deficiencies in the import testing processes or from issues specific to the samples.

The new energy label (Figure 5) includes a QR code that links to an EU-wide database where consumers can find more detailed information about the product.

6 Conclusions

Before discussing the results, it should be noted that the low sample size in the study is due to the limited time available for working with the test system. The length of time required for the system to reach its nominal temperature and for the LEDs to stabilize has constrained our sample size. To represent the general situation, the samples were selected from among well-known imported brands, domestic products, and low-cost imported brands, focusing on low-power models intended for home use.

It is clear that the EU 2019/2015 regulations will increase the pressure on the already highly competitive lighting market. Although some brands appear to be twice as efficient as others in terms of light output per watt, they may only be ranked one level higher according to the new labeling. The reason all brands meet the efficiency requirements at the lowest level in the tests is that the EU 2019/2015 regulations do not have a minimum lm/w limit for class G. Therefore, relatively efficient products should be at least class F. Informing end users about this is important for the efficient use of energy.

While the sample size in this study may be limited, it provides valuable technical insights into the compliance of LED lamps produced in Türkiye with the latest energy labeling regulations. Moreover, this research serves as a reference point for manufacturers aspiring to establish a presence in the Turkish and EU LED lighting market, emphasizing the importance of adhering to ecodesign and energy efficiency standards to meet consumer and regulatory expectations.

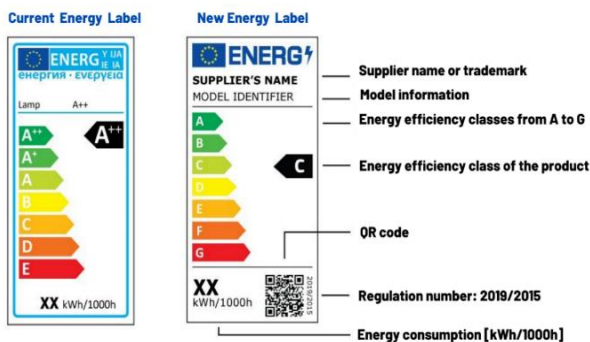


Figure 5. Current and new energy class labels for lamps

Table 7. Comparison of energy classes of selected LED lamps according to according to the EU 874/2012 and EU 2019/2015 regulations

Electrical Parameters of the LED Lamps				EU 874/2012	EU 2019/2015			
Product Code	Luminous Flux [Ø] (lm)	P_{on} (W)	P_{cor} (W)	Calculated Equivalent Power (P_{ref}) (W)	Energy Efficiency Index (EEI)	Energy Efficiency Class	Total mains efficacy (η_{TM}) (lm/W)	Energy Efficiency Class
A Brand	402	5	5.04	37	0.135	A+	79.8	G
B Brand	533	6.5	5.61	46	0.121	A+	95.0	F
C Brand	431	7	6.41	39	0.163	A+	67.2	G
D Brand	234	7	4.84	25	0.206	A	48.3	G
E Brand	274	5	4.77	28	0.170	A	57.4	G
F Brand	272	5	3.94	28	0.142	A+	69.0	G
G Brand	319	8	5.71	31	0.182	A	55.9	G
H Brand	864	8.5	8.09	68	0.119	A+	106.8	F
I Brand	876	9	8.31	69	0.120	A+	105.4	F
J Brand	795	9.5	8.45	64	0.133	A+	94.1	F

Acknowledgements

The authors would like to thank Mono Lighting for the support provided for laboratory and test equipments.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest

Similarity rate (iThenticate): 15%

References

- [1] G. Zissis, Bertoldi, P., Serrenho, T., "Update on the Status of LED-Lighting world market since 2018 ", Publications Office of the European Union, Luxembourg 2021, 978-92-76-27244-1, 2021.
- [2] U. S. D. o. Energy. "U.S. Department of Energy." <https://www.energy.gov/articles/rise-and-shine-lighting-world-10-billion-led-bulbs> (accessed 05.05.2021).
- [3] "Global Markets Insights, Smart Lighting Market Analysis - Global Industry Share Forecast 2025," GMI413, August 2019 August 2019.
- [4] N. U. Islam, M. Usman, and T. Jamil, "Energy-savings using solid-state lighting: A case study of India, Pakistan, and Bangladesh," Energy Policy, 160, p. 112676, 2022.
- [5] E. C. Directorate-General for Energy, Ecodesign impact accounting annual report 2021. <https://data.europa.eu/doi/10.2833/38763> (accessed 15.05.2024).
- [6] "Energy Savings Forecast of SolidState Lighting in General Illumination Applications." <https://www.energy.gov/eere/ssl/articles/2019-ssl-forecast-report>, (accessed).
- [7] C. Ji, W. Xu, Q. Han, T. Zhao, J. Deng, and Z. Peng, "Light of carbon: Recent advancements of carbon dots for LEDs," Nano Energy, 114, p. 108623, 2023.
- [8] Y. Yamagata et al., "The Abstracts of Annual Report of Technical Progress," Journal of Science and Technology in Lighting, advpub, 2021, doi: 10.2150/jstl.IEIJ21A000001.
- [9] L. M. S. C. U.S. Department of Energy. <https://www.energy.gov/eere/ssl/articles/2020-led-manufacturing-supply-chain>
- [10] V. J. Ferreira, S. Knoche, J. Verma, and C. Corchero, "Life cycle assessment of a modular LED luminaire and quantified environmental benefits of replaceable components," Journal of Cleaner Production, 317, p. 128575, 2021.
- [11] P. McAllister and I. Nase, "Minimum energy efficiency standards in the commercial real estate sector: A critical review of policy regimes," Journal of Cleaner Production, 393, p. 136342, 2023.
- [12] O. Gazette, "Official Gazette of the Republic of Turkey," 2011, issue no: 28097. [Online]. Available: <http://www.resmigazete.gov.tr/>
- [13] M. U. a. S. Günay. "Energy efficiency of the housing stock in Turkey: the links between energy efficiency and energy poverty." <https://www.eppedia.eu> (accessed 2021.29.12).
- [14] "Simpler EU energy labels for lighting products applicable from 1 September." https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_4484 (accessed January, 2022).
- [15] M. H. Asif, T. Zhongfu, M. Irfan, B. Ahmad, and M. Ali, "Assessing eco-label knowledge and sustainable consumption behavior in energy sector of Pakistan: an environmental sustainability paradigm," Environmental Science and Pollution Research, 30 (14), pp. 41319-41332, 2023.
- [16] I. C. o. Industry, "Electrical Lighting Equipment Manufacturing Industry - Istanbul Chamber of Industry Professional Committees Sector Strategies Project in Global Competition," 2019.
- [17] M. Gonzalez-Torres, P. Bertoldi, L. Castellazzi, and L. Perez-Lombard, "Review of EU product energy efficiency policies: What have we achieved in 40

- years?," *Journal of Cleaner Production*, p. 138442, 2023.
- [18] M. Skourtos, D. Damigos, C. Tourkolias, and A. Kontogianni, "Efficient energy labelling: the impact of information content and style on product choice," *Energy Efficiency*, 14 (6), p. 58, 2021, doi: [10.1007/s12053-021-09950-3](https://doi.org/10.1007/s12053-021-09950-3).
- [19] L. T. F. Schencking and R. Stamminger, "The need for reference machines when energy labelling electric household appliances that are tested to international standards," *Energy Efficiency*, vol. 14, no. 3, p. 28, 2021/02/23 2021, doi: [10.1007/s12053-021-09939-y](https://doi.org/10.1007/s12053-021-09939-y).
- [20] J. Moral-Carcedo and J. Pérez-García, "Measuring aggregate electricity savings from the diffusion of more efficient lighting technologies," *Energy Efficiency*, 14 (7), pp. 1-19, 2021.
- [21] O. J. o. t. E. Union, "Commision Delegated Regulation (EU) No 874/2012," 2012.





Inspection of the accuracy of fringe projection profilometry by using hybrid methods

Hibrit metotlar kullanarak ızgara projeksiyon profilemetrisinin doğruluğunun incelenmesi

Burak Özbay¹ , Zehra Saraç^{2,*} 

^{2,3} Istanbul Medeniyet University, Electrical and Electronics Engineering Department, 34700, Istanbul, Türkiye

Abstract

Fringe Projection Profilometry- FPP system is widely used for three-dimensional(3D) imaging. This system is promising. However, for the changing environmental conditions, the measurement object, system noise, and strong backlighting changing, it is difficult to obtain 3D image accurately by fringe analyzing methods such as Traditional Fourier Transform Method-TFFT in FPP System. Therefore, in this paper, the TFFT method is combined with various method and hybrid methods are formed. The aim is to investigate how these methods affect the accuracy of FPP system. To make this determination, from simulated fringe pattern, phase is calculated. Then the error values are obtained using these phase values. Consequently, it is seen from error results that TFFT with two Dimensional Empirical Mode Decomposition method-2D-EMD-FFT which gives the lowest error, is the most insensitive to the disruptive effects mentioned above. Moreover, it is the most stability and least affected by the geometric of the object under test.

Keywords: Fringe projection Profilometry, Hybrid methods, Fringe analysis, Accuracy

1 Introduction

FPP is a non-contact, non-destructive, reliable, and fast system. Moreover, it is a widely used application in industry as it allows for real-time measurement [1-6]. There are many factors to characterize the performance of FPP system, for example, speed, resolution, accuracy, reliability, cost, application scenario, etc. The most important among these factors is measurement accuracy of FPP system, which is not only determined by technical mechanisms, but is also affected by system components and setup, field of view, system calibration, geometric and surface properties of the measured objects, and ambient lighting [7-10]. The methods used in analyzing the fringe patterns obtained from such a system also influence the accuracy. They are greatly affected by noise, background, vibration, and so on.

Up to date, to reveal the factors mentioned above that affect the accuracy of a system, many studies of both experimental and simulation data have been performed. For

Öz

Izgara Projeksiyon Profilometri-FPP sistemi, üç boyutlu (3D) görüntüleme için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistem umut vericidir. Ancak değişen çevre koşulları, ölçüm nesnesi, sistem gürültüsü ve güçlü arka ışık değişimi nedeniyle FPP Sisteminde Geleneksel Fourier Dönüşüm Yöntemi-TFFT gibi saçak analiz yöntemleriyle doğru 3 boyutlu görüntü elde etmek zordur. Bu nedenle bu bildiriye TFFT yöntemi çeşitli yöntemlerle birleştirilerek hibrit yöntemler oluşturulmuştur. Amaç bu yöntemlerin FPP sisteminin doğruluğunu nasıl etkilediğini araştırmaktır. Bu belirlemeyi yapmak için simüle edilmiş saçak deseninden faz hesaplanır. Daha sonra bu faz değerleri kullanılarak hata değerleri elde edilir. Sonuç olarak, hata sonuçlarından, en düşük hatayı veren İki Boyutlu Ampirik Mod Ayırıştırma yöntemi olan 2D-EMD-FFT'ye sahip TFFT'nin yukarıda bahsedilen bozucu etkilere en duyarlı olduğu görülmektedir. Üstelik test edilen nesnenin geometrisinden en az etkilenen ve en kararlı olanıdır.

Anahtar kelimeler: Izgara projeksiyon Profilometrisi, Hibrit yöntemler, Izgara analizi, Doğruluk

example, Li et al. [7] analyzed how change the accuracy of FPP system by comparing several calibration methods.

Pérez et al. [11] obtained a 3D image of the surface of an oil painting with FPP system and attempted to determine the accuracy of the system experimentally. In this study it is used a four-step phase shift method and concluded that the accuracy of the system was one-tenth of a millimeter.

The higher order harmonics of the distorted fringe affect the accuracy of the FPP system as they cause errors in phase estimation. To solve this problem, Yin et al. [12] proposed a phase estimation method based on a neural network (PWPE-NN). They reported that the phase error caused by conventional methods in FPP systems that do not use a sinusoidal fringe pattern was eliminated by this method.

Lv et al. [13] have attempted a critical theoretical study to provide deep understanding and possible improvement of FPP system. Moreover, they investigated the theoretical effects on the accuracy of FPP, as well.

Nguyen et al. [8] aimed to investigate the accuracy of FPP and digital image correlation technique for 3D imaging.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: zehra.sarac@medeniyet.edu.tr (Z. Saraç)

Geliş / Recieved: 25.03.2024 Kabul / Accepted: 19.09.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1458662

In their study, an experimental investigation into the accuracy comparison of two common 3D imaging systems has been presented: FPP and 3D digital image correlation (3D-DIC) technique. In their study, it was not revealed how the fringe analysis methods used in the system affect the accuracy of the system. By comparing the results of 3D imaging systems, the system that obtained the best image was determined experimentally.

López-Torres et al [9] proposed a method for identifying and removing shadows created by objects during 3D imaging of FPP and Wavelet Transform Profilometry (WTP). In the study, phase images, MSE (mean square error) and PSNR (peak signal-to-noise ratio) calculations, and execution times were presented. The results showed that the 3D imaging process was significantly improved with the removal of shadows.

In 2019, Xu et al. [10] presented a study for 3D imaging of translucent objects with FPP. Three major challenges, which are random errors, phase unwrapping failures, and geometric errors, form, when phase-shifting method for signal analyzing in FPP system is utilized to measure translucent objects. They presented a new method to overcome these challenges. The experimental results revealed that this method provides high accuracy.

In 1993, Perry et al. [1] showed that phase finding algorithms based on the phase shifting technique do not affect the accuracy of the FPP system even if edge effects, discontinuities, and noise are present.

Huang et al. [2] compared several fringe analysis methods used in FPP system in 2010. Although 2D-Windowed Fourier Transform (2D W-FFT) and 2D continuous wavelet transform (2D CWT) algorithms appear to be the most robust methods, they are time consuming and not suitable for real-time processing. All transformation methods performed poorly because of discontinuities in a phase map. In summary, it was concluded that the appropriate method should be selected according to the imaging requirements.

Kaya et al. [14] analyzed the interference fringes by the Hartley transform method (HTM) in the FPP system. It was concluded that although HTM had a short execution time, traditional Fourier Transform method (TFTM) provided a better 3D imaging.

In 2016, Li et al. [15] conducted a study on phase errors occurred when used shearlet transform (STM), EMD-TFFT (Empirical Mode Decomposition-TFFT), and wavelet transform (WTM) methods to calculate the phase in the FPP system.

Dursun et al. [16] investigated the performance of FPP system for 3D imaging by using some fringe analysis methods (the one-dimensional continuous wavelet transform (1D-CWT), 1D-CWT Gradient, TFFT). It was concluded that 1D-CWT has been better than TFFT and 1D-CWT gradient methods to find 3D profile in FPP system.

In 2010, Salvi et al. [17] presented a review study for showing the disadvantages and advantages of the fringe analysis methods, which are single phase shifting (SPS), multiple phase shifting (MPS), TFFT, and CWT.

As can be seen from the studies carried out so far, the accuracy of the FPP system is mostly affected by the signal analysis methods used in phase detection [18-28]. One of these methods is the TFFT method [1-2, 8, 19, 21, 29]. This method has some disadvantages such as edge and discontinuities effects, when used alone, as seen from the literature. In order to eliminate these disadvantages, in this study, hybrid methods, which are (1) TFFT with Savitzky-Golay (SG) Filter [30-32], (2) TFFT with Gaussian Window (W) [2, 33-34], (3) TFFT with 2D Empirical Mode Decomposition [35-38], and (4) TFFT with Modulation [39], were created. Here, a research study revealing how such hybrid methods affect the accuracy of the FPP system is presented for the first time. In addition, it is also revealed how the geometric shape of the object to be 3D imaged affects the phase found with these hybrid methods. Moreover, which method finds the 3D phase map more accurately is given by the error calculation. In this paper, accuracy of the FPP system is represented as phase error, which contains system, background, vibration noise etc.

As a result, it is seen that the TFFT method with 2D-EMD, which gives the lowest error for each object, is the most insensitive to noise. Moreover, it can be said that this hybrid method enables the imaging system to generate accurate results.

This work will be organized as follows. In the second part, the definitions of the hybrid fringe analysis methods used in the FPP system will be presented. In the third part, phases obtained from the fringe patterns (signal) taken from the FPP and phase errors will be shown. In the fourth part, the findings obtained in the results section will be compared and advantages and disadvantages of all hybrid methods will be given.

2 Principles of hybrid fringe analysis methods used in FPP systems

The Fringe Projection system (FPP) is illustrated in Figure 1 and the fringe pattern (signal) obtained from this system is given by Equation 1.



Figure 1. FPP System

2.1 Traditional fourier transform method-TFFT

Traditional Fourier Transform Method was used by Takeda in 1982 for signal (fringe) analysis [29] and a fringe pattern can be given by Equation 1.

$$i(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos(2\pi f_o x + \phi(x, y)) \quad (1)$$

In the equation, a represents the background intensity distribution and b represents the fringe amplitude. ϕ is the phase that carries information about the measured profile. This pattern can also be written as in Equation 2.

$$\begin{aligned} i(x, y) &= a(x, y) \\ &+ \frac{1}{2} b(x, y) \{ \exp(i2\pi f_o x) \exp(i\phi(x, y)) \\ &+ \exp(-i2\pi f_o x) \exp(-i\phi(x, y)) \} \end{aligned} \quad (2)$$

$$i(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos(2\pi f_o x + \phi(x, y)) \quad (3)$$

$$c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) \exp(i\phi(x, y)) \quad (4)$$

Fast Fourier transform of Equation 3 with respect to x, is given in Equation 5.

$$I(\xi, y) = A(\xi, y) + C(\xi - \xi_o, y) + C^*(\xi + \xi_o, y) \quad (5)$$

f is the spatial frequency in the x direction. C^* is complex conjugate of the C .

The background $A(\xi, y)$ and the two frequency components at frequencies $\xi - \xi_o$ and $\xi + \xi_o$ of the signal are separated with the help of Fourier transform. With a band-pass filter (transfer function $H(\xi, y)$), only the $C(\xi - \xi_o, y)$ component is taken, as summarized in Equation 6.

$$C(\xi, y) = (\xi - \xi_o, y) = I(\xi, y)H(\xi, y) \quad (6)$$

Then $c(x, y)$ is obtained by inverse Fourier transform.

$$c(x, y) = \text{ifft}\{I(\xi, y)H(\xi, y)\} \quad (7)$$

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{\text{im}\{c(x, y)\}}{\text{re}\{c(x, y)\}} \quad (8)$$

$\text{im}\{c(x, y)\}$; imaginary part of $c(x, y)$, $\text{re}\{c(x, y)\}$; is the real part. This discontinuous phase is between $-\pi$ and $+\pi$. This phase is made continuous $[\theta(x, y)]$ using an appropriate unwrap algorithm. The phase is calculated for both the reference and the image captured with the object and the difference presented in Equation 9.

$$\Delta\theta = \theta_o - \theta_{ref} \quad (9)$$

Here θ_o , is the phase obtained from the unwrapped object image and θ_{ref} is the unwrap phase obtained from the reference image.

The flowchart used for the algorithm of this method is presented in Figure 2.

2.2 TFFT method with SG Filtering (SG-FFT)

A SG (Savitzky Golay) filter can be used to solve the problem of noise in the fringe pattern [30]. It is a simplified method for calculating the discrimination and smoothing of data with the least squares technique. The calculation speed of this method is better than the least squares technique. A major disadvantage of the method is that some of the initial and final data points cannot be corrected with the original SG method. However, Steinier et al. and Khan overcomes this problem [31].

The filter length or frame size N is odd, whereby it is assumed to be $N = 2M + 1$ ve $N \geq d + 1$, with d = the degree of polynomial. x_n , if there is noisy sample, $n = 0, 1, \dots, L - 1$ and if we convert them to smoothed outputs to y_n , $n = 0, 1, \dots, L - 1$; then the data vector x , $n = L$ entry points and each side of x has N dimensions and M points; which replaces $x = [x_{-M}, \dots, x_{-1}, x_0, x_1, \dots, x_M]^T$ with $x = [x_0, x_1, \dots, x_{L-1}]^T$. The output is described as follows. If we consider the state 1 output first; the first $M + 1$ output y_i is calculated.

$$y_i = b^T_{M-i} w(M), \quad i = 0, 1, \dots, M \quad (10)$$

The state vector is:

$$w(M) = \begin{bmatrix} x_{N-1} \\ \vdots \\ x_0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

SG filtering is a popular method for smoothing data and calculating derivatives of noisy data based on local least squares fit of data with polynomials. SG filters are usually applied to equidistant data points, whereby each data point is based on fitting a polynomial of order n given the data in a (usually symmetric) $k - m \dots k + m$ neighborhood of k (this range contains two $m+1$ data points). This filtering method was investigated in 1964 by Abraham Savitzky and Marcel J. E. Golay [30-32].

In this method, after SG Filtering, The TFFT is applied and the phase difference is obtained by Equation 9. The flow chart of SG-FFT hybrid method is presented in Figure 3.

2.3 TFFT with Gaussian Window (W-FFT)

In this section, an explanation will be given using the traditional Fourier transform method. The 1D Fourier transform can be described by the following equation

$$I(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} i(x) \exp(-j\xi x) dx \quad (12)$$

$$i(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} I(\xi) \exp(j\xi x) d\xi \quad (13)$$

$I(\xi)$ is the Fourier transform of $i(x)$. The windowed Fourier transform of $i(x)$ and its inverse can be written as:

$$S(u, \xi) = \int_{-\infty}^{\infty} i(x)g(x - u) \exp(-j\xi x) dx \quad (14)$$

$$i(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S(u, \xi)g(x - u) \exp(j\xi x) d\xi du \quad (15)$$

$S(u, \xi)$ is known as the windowed Fourier spectrum; $g(x)$ is the window selected as the Gaussian function.

$$g(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (16)$$

$g(x)$ is the parameter that controls the length of σ . With normal Fourier transform, $i(x)$ is converted to $I(\xi)$, but there is only frequency information. Location information is almost never identifiable. The frequency information in the spectrum is obtained from $I(\xi)$, but it is not known where these frequencies are in relation to the signal. On the contrary, by using W-FFT it is possible to reach not only the frequency component, but also the positional information. This transformation technique offers two advantages:

- 1- Since W-FFT is performed over an area determined by the length of $g(x)$ (provided that their distance is greater than the effective radius of the Gaussian window), a signal at one location will not affect a signal at another location in spectral analysis
- 2- It is easier to study the spectrum of a signal in a local field than to study the entire field spectrum, therefore, the W-FFT spectrum is easier to interpret

The spectrum of W-FFT can be studied in two ways:

- 1- By performing thresholding, low amplitude spectral components are reset, thus, the noise spreads over the entire spectrum. As noise disappears, a high quality signal can be reconstructed.
- 2- The frequency corresponding to the peak of the spectrum is considered the local frequency or instantaneous frequency. This approximation shows that the spectrum of the signal in a local area is simple and consists of only one frequency.

Based on W-FFT, two different approaches are possible for fringe demodulation called the windowed Fourier filtering (W-FFT) method and the windowed Fourier ridges (W-FFR) method. W-FFT filters the fringe pattern in the windowed Fourier space and W-FFR provides the best match between the fringe pattern and computer-generated windowed exponentials. In this study The W-FFT method is used [33-34].

As seen in Equation 2, the fringe pattern consists of two exponential functions and background density. When we consider the carrier frequency, there are three spectrum components in the frequency domain. The W-FFT of Equation 2 can be written as follows:

$$i(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \{[i(x) \otimes h(x, \xi)] \otimes h(x, \xi)\} d\xi \quad (17)$$

$h(x, \xi) = g(x)\exp(j\xi x)$ taken as and \otimes shows the convolution. If W-FFT is written in a specific region, it can be expressed by the equation given below:

$$\overline{i(x)} = \frac{1}{2\pi} \int_a^b [i(x) \otimes h(x, \xi)] \otimes h(x, \xi) d\xi \quad (18)$$

If $|i(x) \otimes h(x, \xi)|$ is less than a certain threshold value, it behaves as noise and is removed at reset. Threshold selection is important. The integral boundaries are between a and b . Thus, in the 2D spectrum, only the spectrum of the positive frequency portion is obtained from the three frequency components. In this case, 2D phase can also be written as follows:

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{\text{im}\{\overline{i(x, y)}\}}{\text{re}\{\overline{i(x, y)}\}} \quad (19)$$

The phase difference is obtained by substituting this phase in Equation 9. The flow diagram of the W-FFT method is presented in Figure 4:

2.4 TFFT method with 2D-Empirical Mode Decomposition (2D-EMD-FFT)

For the EMD method developed by Huang et al., the non-stationary signal is made stationary using the signal Hilbert-Huang transform [35]. Here it is considered that the signal can have more than one different simultaneous mode of modals (intrinsic mode functions [IMFs]). Based on this idea, a complex signal can be decomposed into the sum of several IMFs and one residue, which can be easily modelled. Here, IMFs are extracted based on the local characteristic scale of the complex signal. In EMD, the IMF and the residuals are used to obtain the original signal without loss of information and error. When creating IMFs, they must meet certain conditions. For example, the number of zero crossings must be equal to the number of endpoints or the difference between them must be one. The other condition is that the mean value of the upper envelope and lower envelope must be zero for each instance of the sign. Interpolation of upper envelope maximum points are found by interpolation of the minimum points in the lower envelope. The resulting IMFs are nearly orthogonal to each other [36]. They describe 1D-EMD and [37-38]. 2D-EMD and here, 2D-IMF is used. First, the IMFs of the $i(x, y)$ sign are found, then the numbered IMFs are taken, they are added together, and the filtered signal becomes as in Equation 3. This signal is in the order of the traditional Fourier transform and the phase difference is obtained by applying the operations in Equations 5 and 9.

The flow diagram of the 2D-EMD-FFT method is presented in Figure 5.

2.5 TFFT method with modulation (GPM-FFT)

In this method, $i(x)$ and $g(x)$ Gaussian windows are multiplied. Then, the spatial frequency plane is passed with Fourier transform. Afterwards, the steps in the traditional Fourier transform method are applied and the phase is obtained. The equations of the method are presented below. The multiplication of the interference pattern and the Gaussian window obtained is as follows:

$$f(x) = i(x) g(x) \tag{20}$$

The multiplication represents the modulation in the spatial plane. By taking the Fourier transform, Equation 21, the modulation process is obtained in the frequency plane.

$$F(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \exp(-j\xi x) dx \tag{21}$$

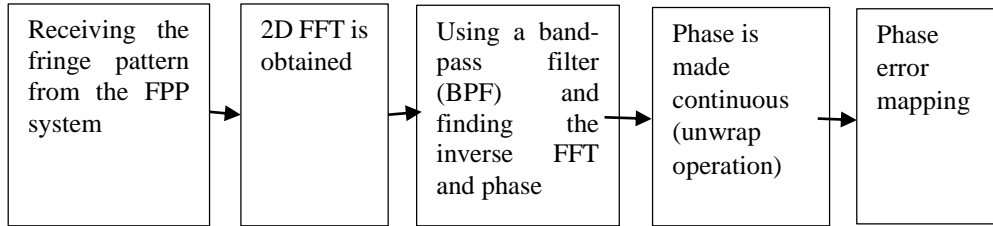


Figure 2. Flowchart of TFFT Method

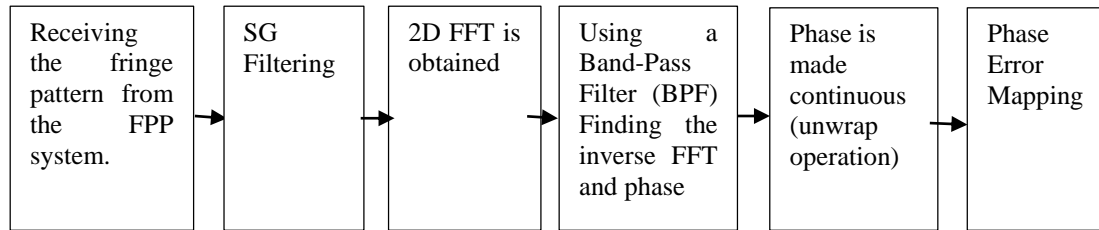


Figure 3. Flowchart of the SG-FFT Method

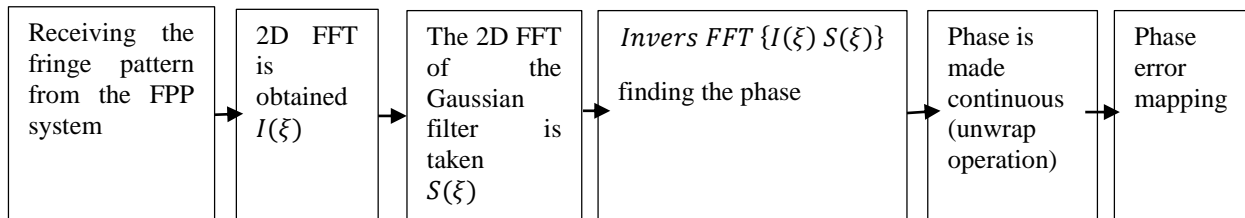


Figure 4. Flowchart of the W-FFT method.

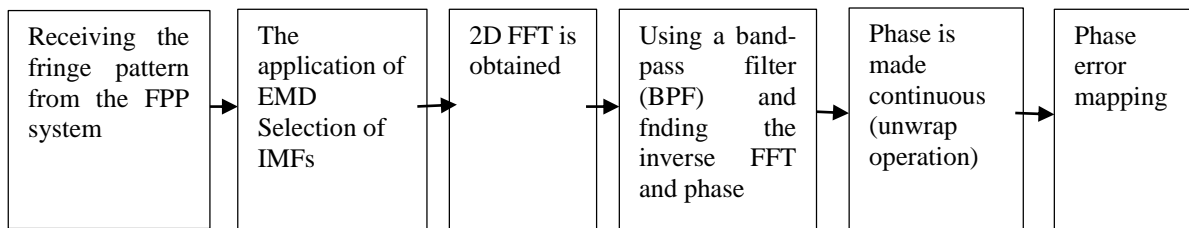


Figure 5. Flowchart of the 2D-EMD-FFT method.

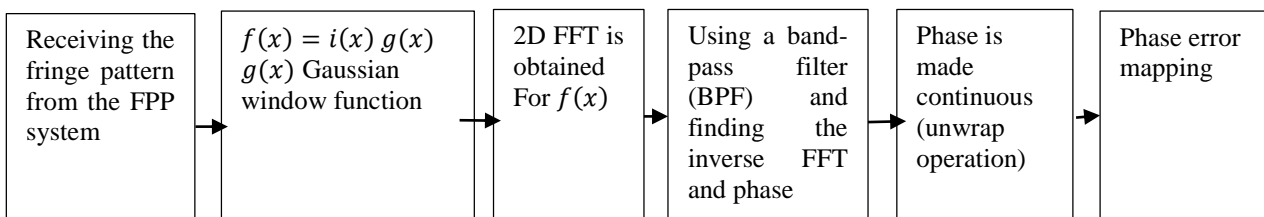


Figure 6. Flowchart of GPM-FFT Method

Then the signal with edge effects is removed and high frequency noise components eliminated. The signal is processed with the conventional Fourier transform (as in Equation 6) and the phase difference is obtained with Equation 9.

The flow chart of the method is illustrated in Figure 6.

3 Simulations and presentation of results

In this section, simulation studies and their results will be presented. Three objects were selected to simulate the signal received from the 3D imaging system (FPP). It is assumed that a 3D image of the hemisphere, cone, and complex crested objects shown in Figure 7 are obtained from this system. The 2D fringe pattern captured by the camera in such a system (commonly a charge coupled device [CCD] is used) can be mathematically given by the Equation 22:

$$i(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos(2\pi f_0 x + \phi(x, y)) + noise \quad (22)$$

The $\phi(x, y)$ phase in this equation is the phase information derived from the mathematical expressions of the selected objects.

$i(x, y)$; is produced as an image with 512x512 pixels. This means camera resolution is accepted 512x512 pixels.

In $i(x, y)$, $\phi(x, y)$ is produced as a 512x512 pixel image and is represented by Equation 23 for the hemisphere:

$$\phi(x, y) = Re \left\{ 10 \sqrt{1 - \frac{(x - 256)^2 + (y - 256)^2}{240^2}} \right\} \quad (23)$$

Here, $Re\{ \}$ represents the real part of the complex expression. Spatial frequency of the fringe pattern is set to $f_0 = 1/16$. $a(x, y)$ background intensity, it is defined as 1. $b(x, y)$ modulation intensity is 1. White Gaussian noise (WGN) was selected as the noise and the power of the noise samples is specified as scalar and is taken as 8 dBW.

The original phase $\phi(x, y)$ for the actual hemisphere obtained by using equation 23 is given in Figure 7(a).

For cone shapes, the phase expression in Equation 22 is taken as in Equation 24. However, phases less than 200 are taken as zero and replaced in phase (Equation 24):

$$\phi(x, y) = 50 \left(1 - \frac{\sqrt{(x - 256)^2 + (y - 256)^2}}{200} \right) \quad (24)$$

The original phase $\phi(x, y)$ for the actual cone obtained by using equation 24 is given in Figure 7(b).

The phase expression in Equation 22 is taken as in Equation 25 for a complex crested shape:

$$\phi(x, y) = 3(1 - x)^2 e^{(-x^2 - (y+1)^2)} - 10 \left(\frac{x}{5} - x^3 - y^5 \right) e^{(-x^2 - y^2)} - \frac{1}{3} e^{(-(x+1)^2 - y^2)} \quad (25)$$

The original phase $\phi(x, y)$ for the actual complex crested shape obtained by using equation 25 is given in Figure 7(c).

Fringe patterns of objects obtained from the 3D FPP using these objects and the simulation results are presented in Figure 8.

In addition, the simulated reference image (using Equation 26) obtained from the FPP without placing the object is presented in Figure 9.

$$i_{ref}(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos(2\pi f_0 x) + noise \quad (26)$$

The unwrap phases (ϕ_0, ϕ_{ref}) are calculated by using the simulated pattern $i(x, y)$ and $i_{ref}(x, y)$ obtained from the FPP for a hemispherical object. The noisy phase map ($\phi_{son}(x, y)$) is obtained by Equation 27.

$$\phi_{son}(x, y) = \phi_0(x, y) - \phi_{ref}(x, y) \quad (27)$$

Firstly, $\phi_{son}(x, y)$ is found for hemispherical object by TFFT in Figure 10(a). The result obtained by SG-FFT is given in Figure 10(b). The results calculated by using W-FFT, 2D-EMD-FFT, and GPM-FFT hybrid methods are illustrated in (c), (d), and (e), respectively.

To compare which of these methods has the least noise, the error (error=e) values are calculated by Equation 28. In here, $\phi(x, y)$ is calculated by Equation.23 for hemispherical object. The error values are presented in Figure 11 for (a) TFFT, (b) SG-FFT, (c) W-FFT, (d) 2D-EMD-FFT, and (e) GPM-FFT hybrid methods, respectively.

$$e = \phi_{son}(x, y) - \phi(x, y) \quad (28)$$

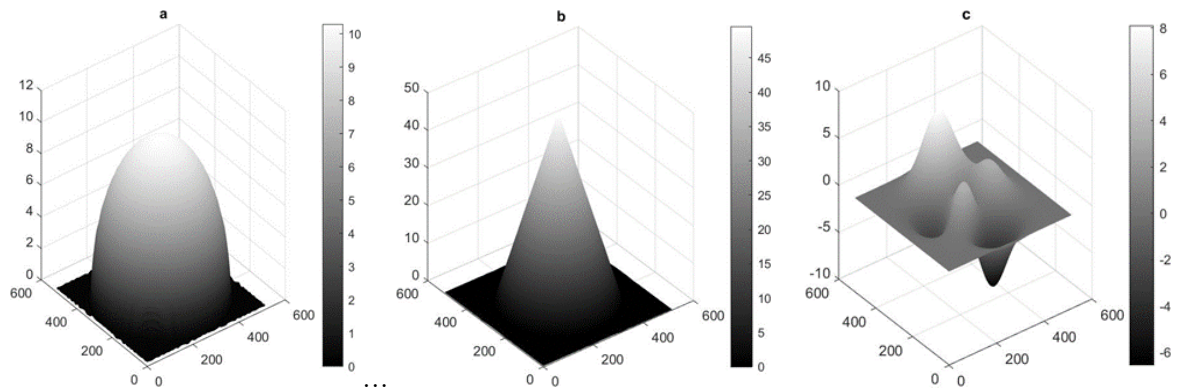


Figure 7. The original phases for (a) hemisphere, (b) cone, and (c) complex crested objects.

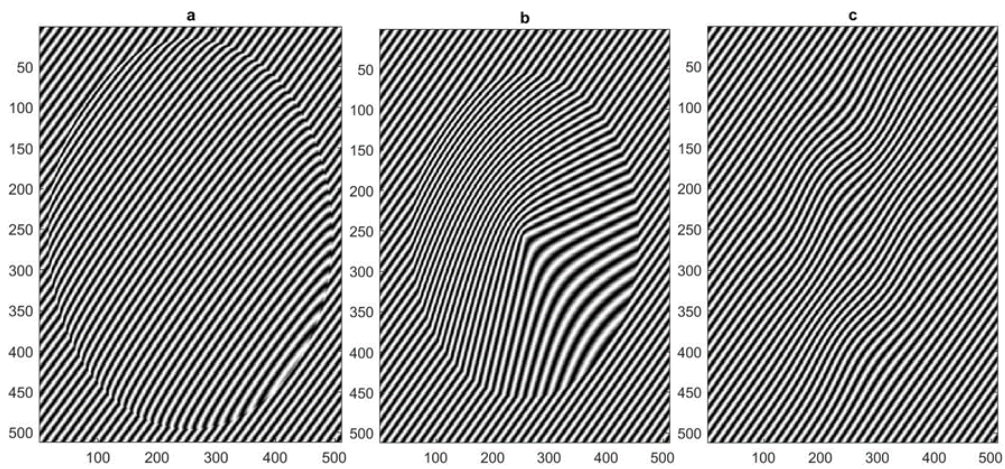


Figure 8. 2D images of simulated fringe patterns using relevant phases (bodies) for (a) hemisphere, (b) cone, and (c) complex crested shape.

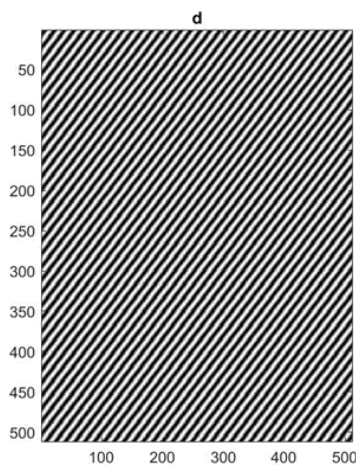


Figure 9. The image of fringe pattern simulated using reference $i_{\text{ref}}(x, y)$.

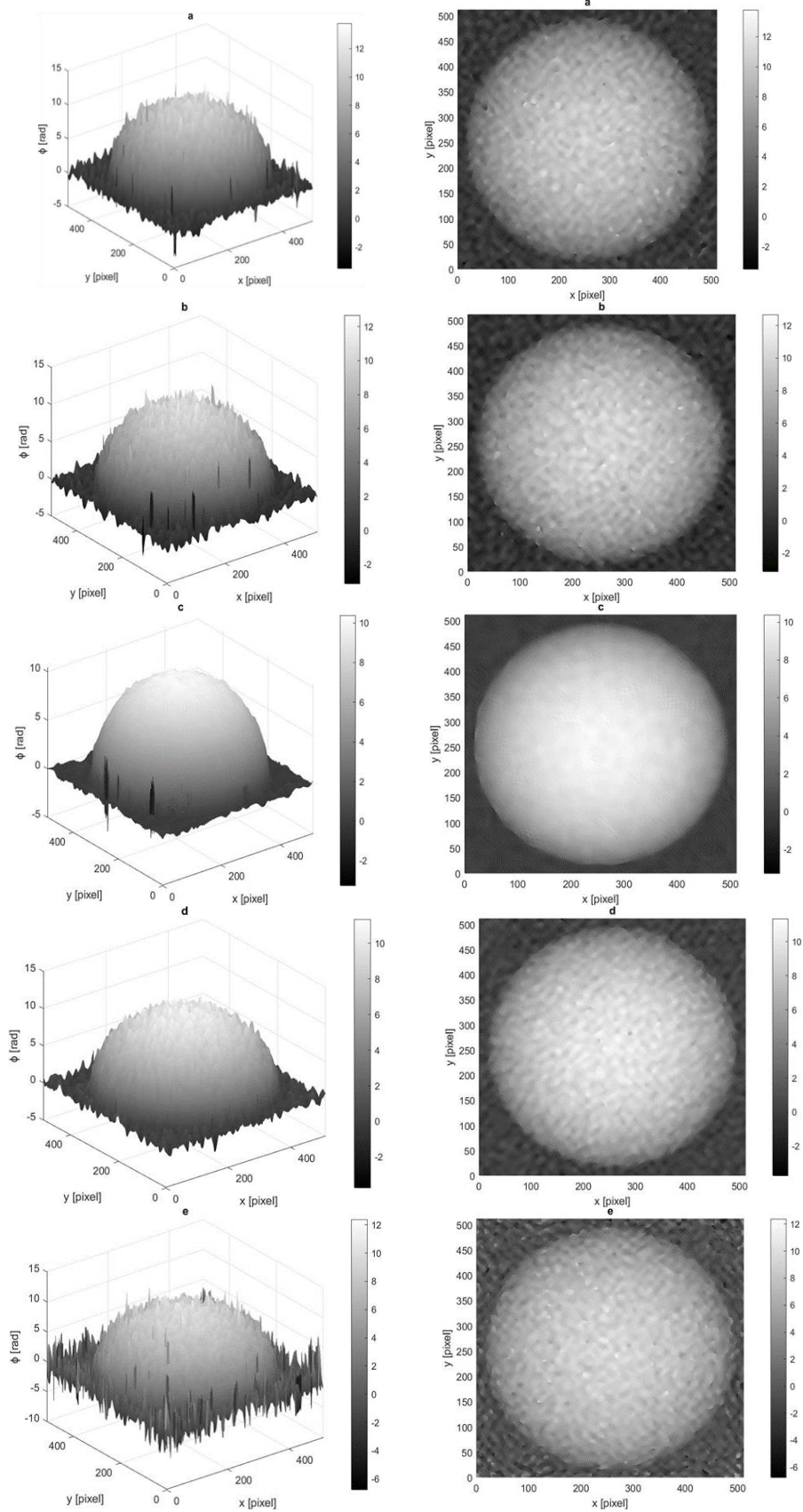


Figure 10. Phase maps, $\phi_{\text{son}}(x, y)$ (noisy phase), obtained using (a) TFFT, (b) SG-FFT, (c) W-FFT, (d) 2D-EMD-FFT, and (e) GPM-FFT hybrid methods from simulated fringe patterns for the hemispherical object.

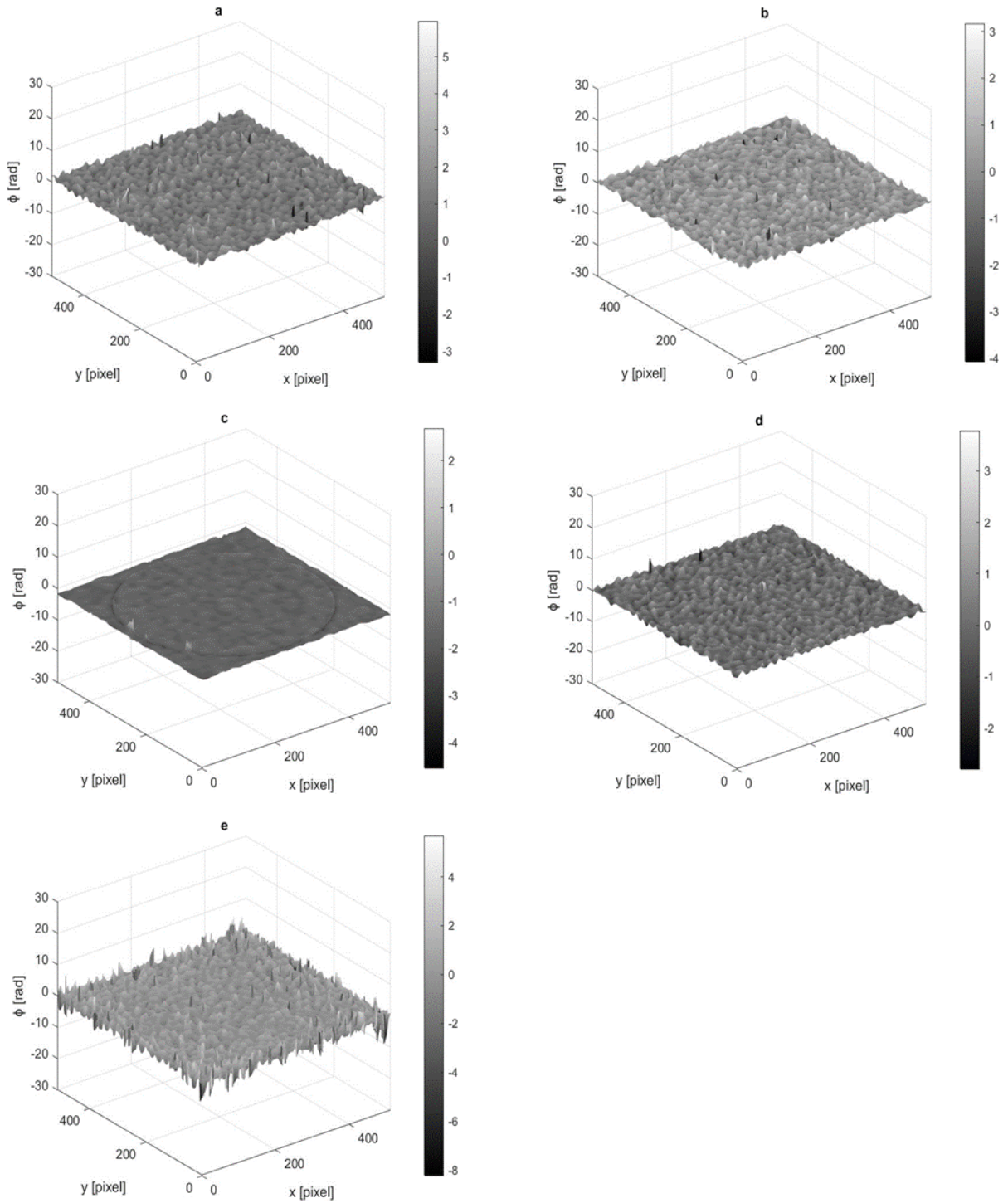


Figure 11. Error maps obtained by Equation 28 between actual phase and noisy phase. $\phi_{son}(x, y)$ was obtained with (a) TFFT, (b) SG-FFT, (c) W-FFT, (d) 2D-EMD-FFT, and (e) GPM-FFT hybrid methods from the simulated fringe pattern images for the hemispherical object.

The unwrap phase, $\phi_{son}(x, y)$, is found for cone object by TFFT in Figure 12(a) by using Equation 27. The result obtained by SG-FFT is given in Figure 12(b). The results calculated by using W-FFT, 2D-EMD-FFT, and GPM-FFT hybrid methods are illustrated in (c), (d), and (e), respectively.

To compare which of these methods has the least noise, the error (error=e) values are calculated by Equation 28. In here, $\phi(x, y)$ is calculated by Equation.24 for cone object. The error values are presented in Figure 13 for (a) TFFT, (b) SG-FFT, (c) W-FFT, (d) 2D-EMD-FFT, and (e) GPM-FFT hybrid methods, respectively.

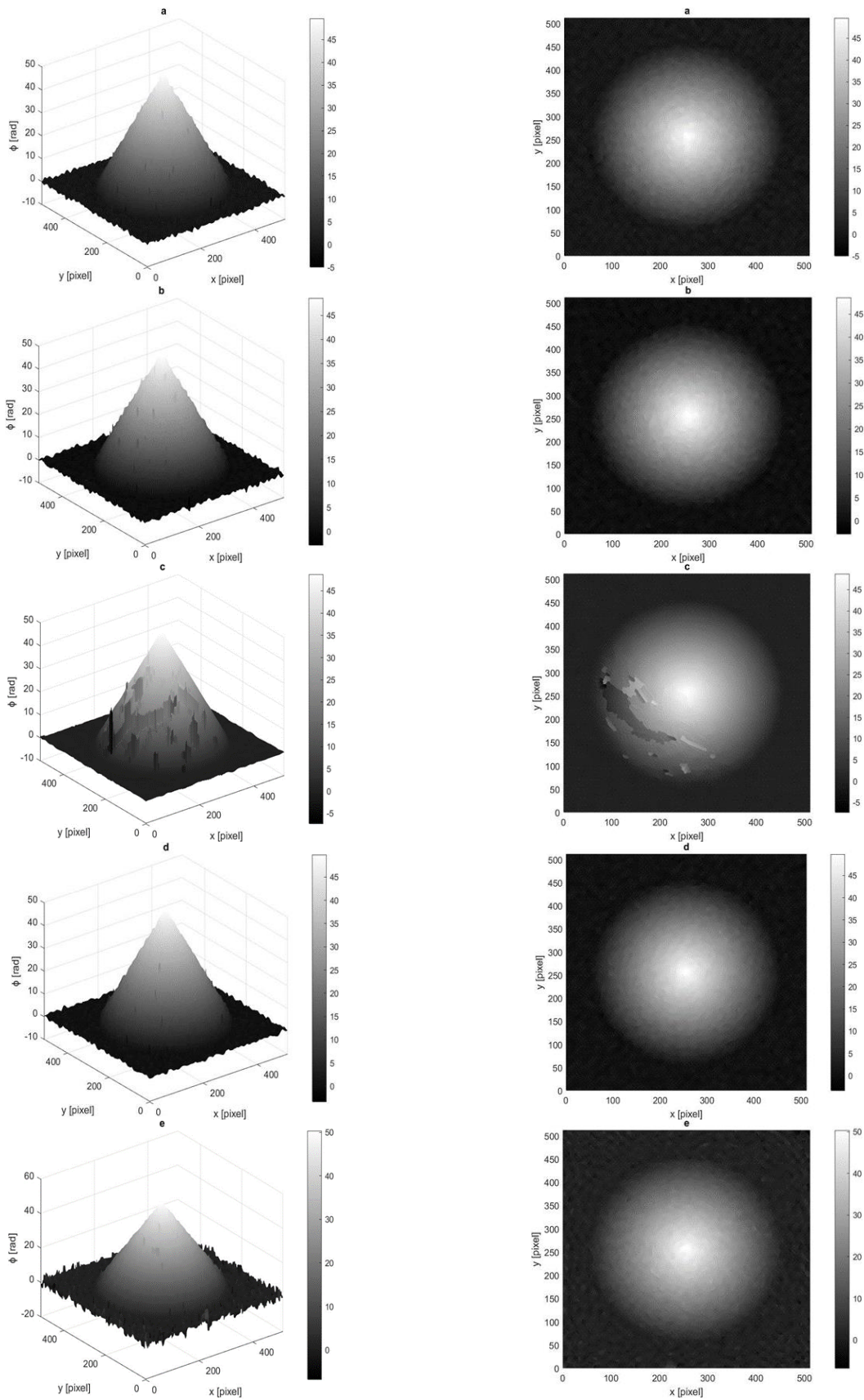


Figure 12. Phase maps, $\phi_{\text{son}}(x, y)$ (noisy phase), obtained using (a) TFFT, (b) SG-FFT, (c) W-FFT, (d) 2D-EMD-FFT, and (e) GPM-FFT hybrid methods from the simulated fringe pattern images for the cone object.

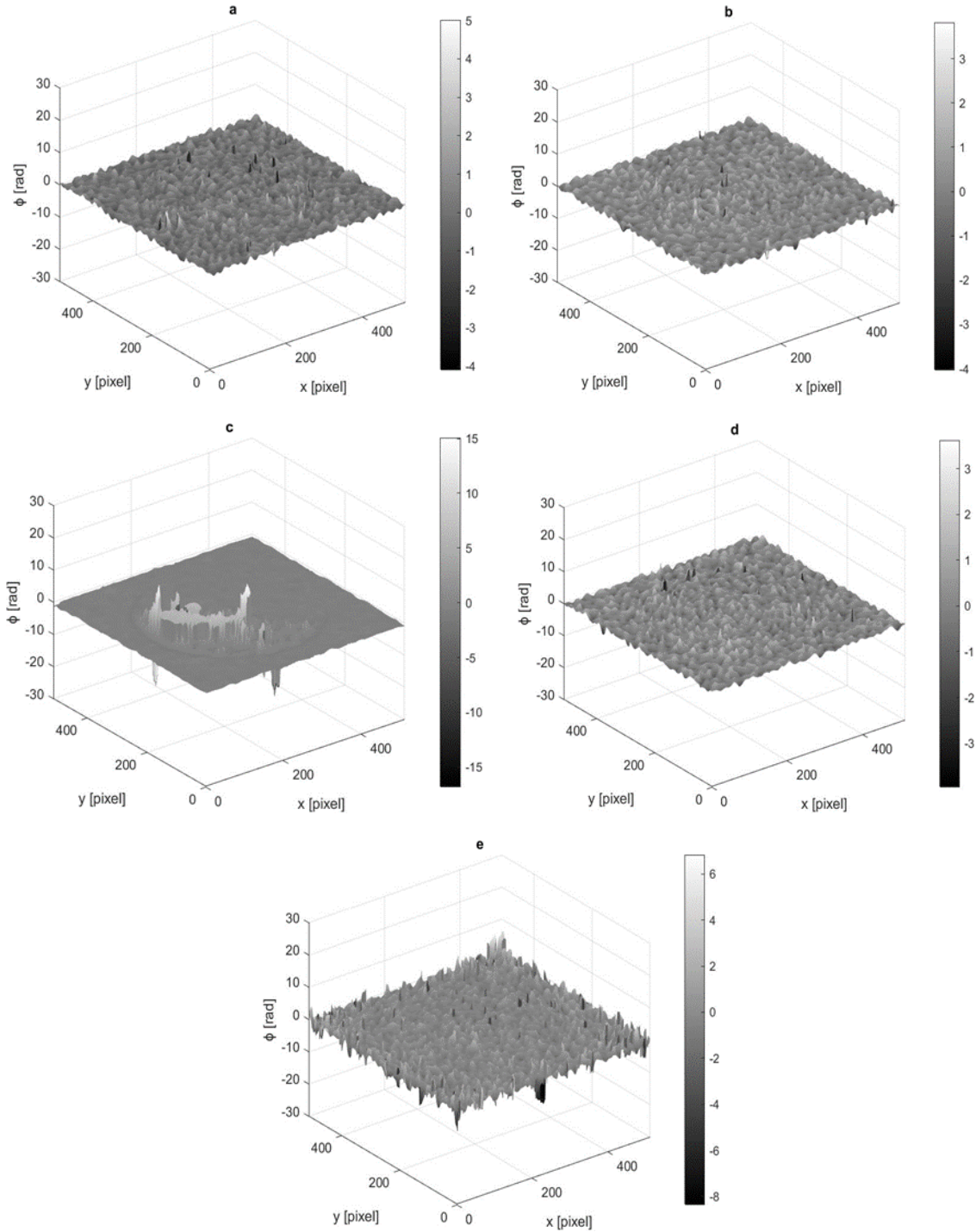


Figure 13. Error maps obtained by Equation 28 between actual phase and noisy phase, $\phi_{son}(x,y)$ obtained using (a) TFFT, (b) SG-FFT, (c) W-FFT, (d) 2D-EMD-FFT, and (e) GPM-FFT hybrid methods from the simulated fringe pattern images for the cone object.

The unwrap phase $\phi_{son}(x,y)$ is found for complex crested object by TFFT in Figure 14(a). The result obtained by SG-FFT is given in Figure 14(b). The results obtained by using W-FFT, 2D-EMD-FFT, and GPM-FFT methods are illustrated in (c), (d), and (e), respectively.

To compare which of these methods has the least noise, the error (error=e) values are calculated by Equation 28. In here, $\phi(x,y)$ is calculated by Eq.25 for complex crested

object. The error values were presented in Figure 15 for (a)TFFT, (b) SG-FFT, (c) W-FFT, (d) 2D-EMD-FFT, and (e)GPM-FFT hybrid methods, respectively.

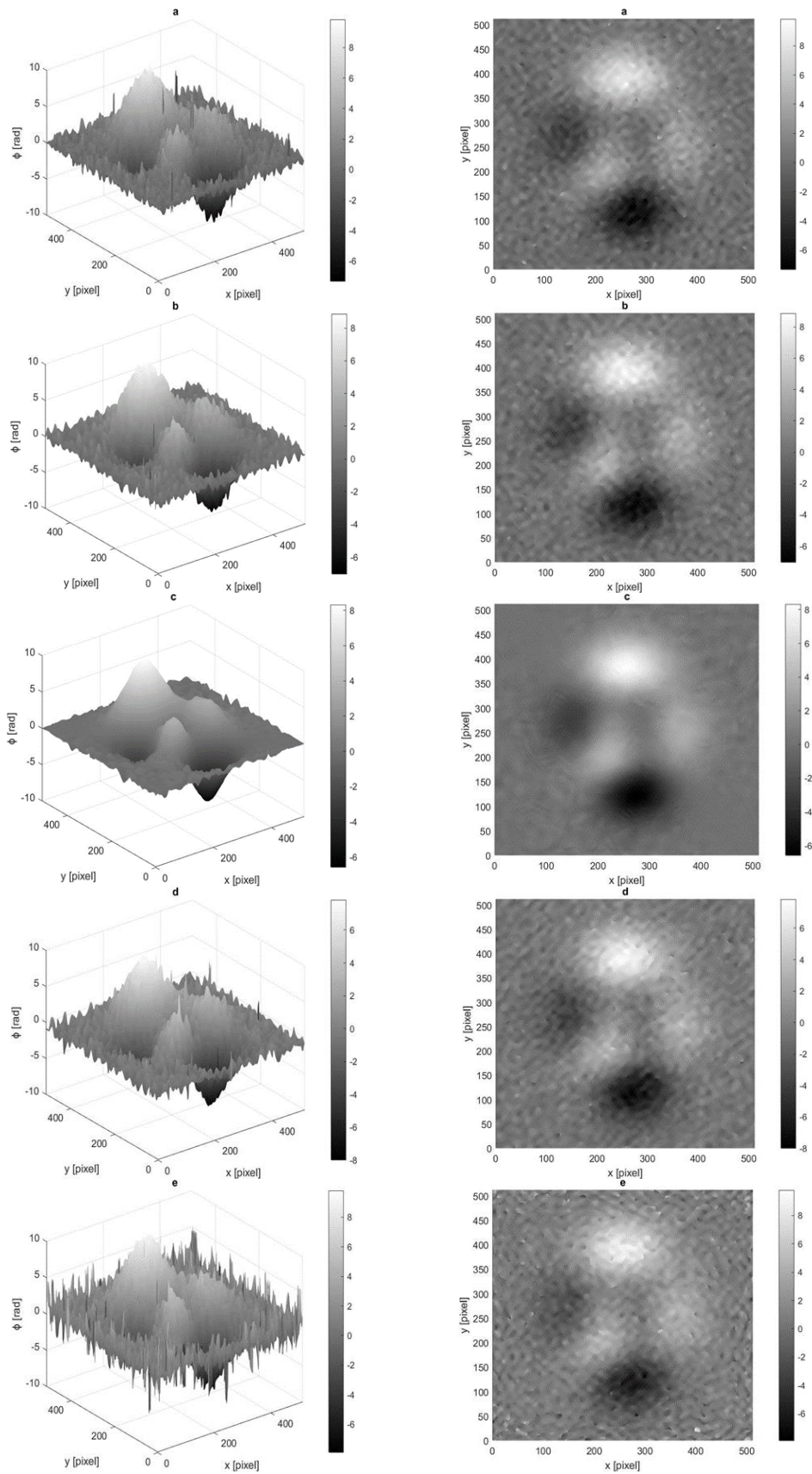


Figure 14. Phase maps, $\phi_{\text{son}}(x, y)$ (noisy phase), obtained using (a) TFFT, (b) SG-FFT, (c) W-FFT, (d) 2D-EMD-FFT, and (e) GPM-FFT hybrid methods, from the simulated fringe pattern images for the complex crested object.

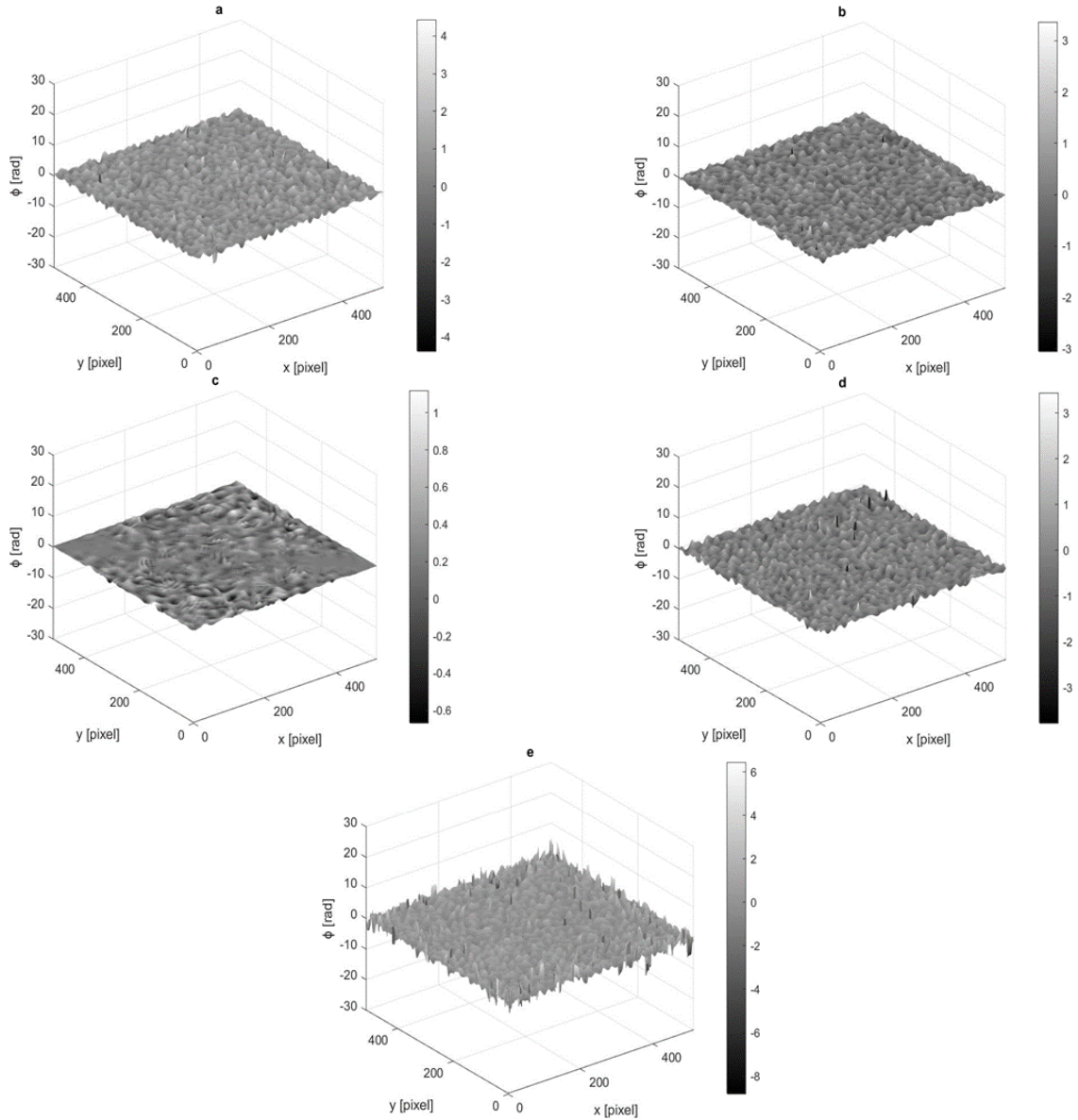


Figure 15. Error maps calculated by Equation 28 between actual phase and noisy phase, $\phi_{\text{son}}(x, y)$ obtained using (a) TFFT, (b) SG-FFT, (c) W-FFT, (d) 2D-EMD-FFT, and (e) GPM-FFT hybrid methods from the simulated fringe pattern images for the complex crested object.

4 Conclusions and discussion

In this paper, accuracy parameter, which show the performance of FPP system, is inspected and represented as phase error, which contains system, background, vibration noise etc. In addition, it is mostly affected by the fringe analysis methods used in phase detection. One of these methods, which has some disadvantages such as edge and discontinuities effects, is TFFT. In this paper, because of this, the TFFT is combined with some method and hybrid methods which are called as SG-FFT, W-FFT, 2D-EMD-FFT, and GPM-FFT are formed. Here, the purpose is to show how such hybrid methods affect the accuracy of the system for the first time. In addition, it reveals how the geometric shape of measured object affects the phase obtained by these hybrid methods. In same time, which method gives the 3D phase map more accurately is presented by the error

calculation. It was concluded from phase and its error values obtained for three objects (hemispherical, cone, complex crested objects) as follows:

- 1- The phase and error values obtained for hemispherical object are presented in Figure 10 and 11, respectively. As can be seen from Figures, the most accurate phase result for such an object is obtained by the 2D-EMD-FFT method (see Figure 10(d), 11(d)). If the methods are ranked from most to least accurate, they would be as follows: W-FFT (see Figure 10(c), 11(c)), SG-FFT (see Figure 10(b), 11(b)), TFFT (see Figure 10(a), 11(a)) and lastly GPM-FFT (see Figure 10(e), 11(e)). As already established, the phase information obtained from the FPP system with the specified methods is

greatly affected by system noise, background, vibration etc. Here, it can be said that 2D-EMD-FFT results (see Figure 10(d) and 11(d)) are better because this method eliminates especially the background noise.

The best phase and error results for hemispherical object are obtained by 2D-EMD-FFT hybrid method.

- 2- The results obtained for the cone object are given in Figure 12 and 13, respectively. As with the hemispherical object, 2D-EMD-FFT is the method that gives the most accurate results (see Figure 12(d), 13(d)) and presents the least error. The second most accurate method is SG-FFT (look at Figure 12(b), 13(b)) followed by TFFT (Figure 12(a), 13(a)), GPM-FFT (Figure 12(e), 13(e)), and W-FFT (see Figure 12(c) and 13(c)). As expected, the 2D-EMD-FFT method gives the best results.

The best phase and error results for cone are obtained by 2D-EMD-FFT hybrid method again.

- 3- Considering the 2D and 3D phase (see Figure 14) and the error values (see Figure 15) calculated using the fringe patterns obtained from FPP system for complex crested shape, W-FFT gives the best results (see Figure 14(c), 15(c)). The smallest error is observed with this method (see Figure 15(c)). W-FFT is followed by 2D-EMD-FFT (look at Figure 14(d), 15(d)) and SG-FFT (see Figure 14(b) and 15(b)) in terms of effectiveness. TFFT (look at Figure 14(a), 15(a)) is better in every way than GPM-FFT (see Figure 14(e), 15(e)).

Although the best phase and error results for complex crested shape are obtained by W-FFT hybrid Method, 2D-EMD-FFT follows it with very small difference. This means that 2D-EMD-FFT is very stability. In every situation it gives more accurate result.

As a result, it is seen that the effectiveness of hybrid methods depends on the surface properties, material and geometric shape of the measured object.

First result is that the 2D-EMD-FFT method presents the least error in all conditions and is least affected from the changing environmental conditions, the geometry and surface structure of measured object.

Second result is that SG-FFT hybrid method follows 2D-EMD-FFT, but sometimes may reduce the accuracy of the system directly. Because SG Filter makes the smoothing process, which affects the properties of the surface of tested object.

Third result is that GPM-FFT hybrid method gives the greatest error unconditionally and reduces the accuracy of the FPP system. It is concluded that GPM-FFT is not suitable for fringe analysis.

The last result is that W-FFT is not a method that increases the accuracy of the system as much as suggested in the literature [2]. and it does not show stability. In addition,

it can reduce very much the accuracy of the system depending on the geometric shape of the object being measured.

Conflicts of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

Similarity Rate (iThenticate): 16%

References

- [1] K. E. Perry, J. McKelvie, A comparison of phase-shifting and Fourier methods in the analysis of discontinuous fringe patterns. *Optics and Lasers in Engineering*, 19, 269–284, 1993. [https://doi.org/10.1016/0143-8166\(93\)90068-V](https://doi.org/10.1016/0143-8166(93)90068-V).
- [2] L. Huang, Q. Kema, B. Pan, and A. K. Asundi, Comparison of Fourier transform, windowed Fourier transform, and wavelet transform methods for phase extraction from a single fringe pattern in fringe projection profilometry. *Optics and Lasers in Engineering*, 48, 141-148, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.04.003>.
- [3] P. S. Huang, C. Zhang, and F. P. Chiang, High-speed 3D shape measurement based on digital fringe projection. *Optical Engineering*, 42, 163-169, 2003. <https://doi.org/10.1117/1.1525272>.
- [4] Z. H. Zhang, Review of single-shot 3D shape measurement by phase calculation-based fringe projection techniques, *Optics and Lasers in Engineering*, 50 106–1097, 2012. <https://doi.org/10.16/j.optlaseng.2012.01.007>
- [5] P. Zhou, J. Zhu, X. Su, Z. You, H. Jing, C. Xiao, and M. Zhong, Experimental study of temporal-spatial binary pattern projection for 3D shape acquisition. *Applied Optics*, 56, 2995–3003, 2017. <https://doi.org/10.1364/AO.56.002995>.
- [6] A. Martínez, J.A. Rayas, R.R. Cordero, D. Balieiro, and F. Labbe, Leaf cuticle topography retrieved by using fringe projection. *Optics and Lasers in Engineering*, 50, 231-235, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2011.08.011>.
- [7] X. Li, Z. Zhang, and C. Yang, Reconstruction method for fringe projection profilometry based on light beams. *Applied Optics*, 55(34), 9895-9906, 2016. <https://doi.org/10.1364/AO.55.009895>.
- [8] H. Nguyen, J. Liang, Y. Wang, and A. Wang, Accuracy assessment of fringe projection profilometry and digital image correlation techniques for three-dimensional shape measurements. *Journal of Physics: Photonics*, 3 014004 2021. <https://doi.org/10.1088/2515-7647/ab4cbe4>.
- [9] C.V. Lopez, C.S. Salazar, K. Kells, J.C. Pedraza, and J.M. Ramos, Improving 3D reconstruction accuracy in wavelet transform profilometry by reducing shadow effects. *IET Image Processing*, 14, 310–317, 2020. <https://doi.org/10.1049/iet-ipr.2019.0854>.
- [10] Y. Xu, H. Zhao, H. Jiang, and X. Li, High-accuracy 3D shape measurement of translucent objects by fringe projection profilometry. *Optics Express*, 27 (13),

- 18421-18434, 2019. <https://doi.org/10.1364/OE.27.018421>.
- [11] C. Pérez, M. Chávez, F. C. Rivera, D. Sarocchi, C. Mares, and B. Barrientos, Fringe Projection Method for 3D High-Resolution Reconstruction of Oil Painting Surfaces. *Heritage*, 6 (4), 3461–3474, 2023. <https://doi.org/10.3390/heritage6040184>.
- [12] Z. Yin, C. Liu, C. Zhang, X. He, and F. Yang, Point-Wise Phase Estimation Method in Fringe Projection Profilometry under Non-Sinusoidal Distortion. *Sensors*, 22 (12), 4478, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22124478>.
- [13] S. Lv, D. Tang, X. Zhang, D. Yang, W. Deng, and K. Qian, Fringe projection profilometry method with high efficiency, precision, and convenience: theoretical analysis and development. *Optics Express*, 30(19), 33515-33537, 2022. <https://doi.org/10.1364/OE.467502>.
- [14] H. Kaya, Z. Saraç, M. Özer, and H. Taşkın, Optical signal processing of interference fringes by Hartley transform method. 17th Slovak-Czech-Polish Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics, 77461W, Liptovsky Jan, Slovakia, 14-16 December 2010.
- [15] B. Li, C. Tang, X. Zhu, Y. Su, and W. Xu, Shearlet transform for phase extraction in fringe projection profilometry with edges discontinuity. *Optics and Lasers in Engineering*, 78, 91–98, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2015.10.007>.
- [16] A. Dursun, S. Özder, and F. N. Ecevit, Continuous wavelet transform analysis of projected fringe patterns. *Measurement Science and Technology*, 9(15), 0957-0233, 2004. [10.1088/0957-0233/15/9/013](https://doi.org/10.1088/0957-0233/15/9/013).
- [17] J. Salvi, S. Fernandez, T. Pribanic, and X. Llado, A state of the art in structured light patterns for surface profilometry. *Pattern Recognition*. 43. 2666-2680 2010. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2010.03.004>.
- [18] R. W. Wygant, S. P. Almeida, and O. D. D. Soares, Surface inspection via projection interferometry. *Applied Optics*, 27 (22), 4626-4630, 1988. <https://doi.org/10.1364/AO.27.004626>.
- [19] J. Zhong, and J. Weng, Spatial carrier-fringe pattern analysis by means of wavelet transform: wavelet transform profilometry. *Applied Optics*, 43 (26), 4993-4998, 2004. <https://doi.org/10.1364/AO.43.004993>.
- [20] J. Zhou, Wavelet-aided spatial carrier fringe pattern analysis for 3-D shape measurement. *Optical Engineering*, 44 (11), 113602, 2005. <https://doi.org/10.1117/1.2127887>.
- [21] Z. Saraç, H. G. Birkök, H. Taşkın, and E. Öztürk, Evaluation of thermal lens fringes using Hilbert and Fourier transform methods. *IET Science, Measurement and Technology*, 5 (3), 81 – 87, 2011. <https://www.researchgate.net/publication/224238898>.
- [22] C. Zuo, S. Feng, L. Huang, T. Tao, W. Yin, and Q. Chen, Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: A review. *Optics and Lasers in Engineering*, 109, 23-59, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.04.019>
- [23] J. Geng, Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. *Advances in Optics and Photonics*, 3 (2), 128–160, 2011. <https://doi.org/10.1364/AOP.3.000128>.
- [24] H. A. Ali, M. A. Amer, and A. A. Omara, New Simple Large Depth of Field Fringe Projection Profilometry System Using Laser Projector. *Journal of Measurement Science and Applications (JMSA)*, 2(2): 28-39, 2022.
- [25] A. S. Segade, Fringe projection technique: New methods for shape measurement. Ph.D. Thesis, Centro de Investigaciones en Óptica A.C., Mexico, 2015.
- [26] L. Mingzhou, Development of Fringe Analysis Techniques in white light interferometry for micro-component measurement. Ph.D. Thesis, National University of Singapore, Singapore, 2008.
- [27] X. Su, and W. Chen, Fourier transform profilometry: a review. *Optics and Lasers in Engineering*, 35, 263–84, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0143-8166\(01\)00023-9](https://doi.org/10.1016/S0143-8166(01)00023-9).
- [28] S. Zhang, and S-T. Yau, Generic nonsinusoidal phase error correction for three-dimensional shape measurement using a digital video projector. *Applied Optics*, 46 (1), 36–43, 2007. <https://doi.org/10.1364/AO.46.000036>.
- [29] M. Takeda, and K. Mutoh, Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3D object shapes. *Applied Optics*, 22 (24), 3977–3982, 1983. <https://doi.org/10.1364/AO.22.003977>.
- [30] A. Savitzky, M. J. E. Golay, Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, 36 (8), 1627–1639, 1964. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ac60214a047>.
- [31] P. A. Gorry, General lest-squares smoothing and differentiation by the convolution (Savitzky-Golay) method. *Analytical Chemistry*, 62, 570-573, 1990. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ac00205a007>.
- [32] M. A. Awal, S. S. Mostafa, M. Ahmad, Performance analysis of Savitzky-Golay smoothing filter using ECG signal. *International Journal of Computer and Information Technology*, 1(02), 24, 2011. <https://www.researchgate.net/publication/215628178>.
- [33] Q. Kemao, Two-dimensional windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: Principles, applications and implementations. *Optics and Lasers in Engineering*, 45, 304-317, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2005.10.012>.
- [34] Q. Kemao, Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis. *Applied Optics*, 43 (13), 2695-702, 2004. <https://doi.org/10.1364/AO.43.002695>.
- [35] S. Zheng, and Y. Cao, Fringe-projection profilometry based on two-dimensional empirical mode decomposition. *Applied Optics*, 52(31), 7648–7653, 2013. <https://doi.org/10.1364/AO.52.007648>.
- [36] N.E. Huang, Z. Shen, S.R. Long, et al. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-Stationary Time Series Analysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 454 (1971), pp. 903-995, Londra, England, 1998.
- [37] W. Li, J. Huyan, S. L. Tighe, Q. Ren, and Z. Sun, Three-Dimensional Pavement Crack Detection

- Algorithm Based on Two-Dimensional Empirical Mode Decomposition. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 143 (2), 04017005, 2017. <https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000006>.
- [38] X. Zhou, G. Adrian, Z. Yang, T. Yang, and H. Zhao, Morphological operation-based bi-dimensional empirical mode decomposition for automatic background removal of fringe patterns. *Optics Express*, 20 (22), 24247–24262, 2012. <https://doi.org/10.1364/OE.20.024247>.
- [39] S. Ertürk, *Sayısal İşaret İşleme*. 3rd ed., Birsen Yayınevi, İstanbul, 2016.





Uygun maliyetli seyrekliğe duyarlı akustik geri besleme giderici Cost-effective sparsity aware acoustic feedback canceller

Yusuf Eren^{1,*} , Engin Cemal Mengüç² 

¹ Erciyes Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38030, Kayseri, Türkiye

² Kayseri Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38280, Kayseri, Türkiye

Öz

Akustik geri besleme giderici (acoustic feedback canceller, AFC) sistemlerinde karşılaşılan önemli sorunlardan biri AF yolunun seyrek bir doğaya sahip olmasıdır. Bu durum AFC sistemlerinin yakınsama oranını ve kararlı durum hatasını kötüleştirir. Öte yandan konuşma/müzik gibi büyük ölçekli kaynak sinyalleri ve yüksek filtre derecelerinin kullanılması AFC sistemlerinin hesaplama maliyetini artırmaktadır. Bu amaçla, bu çalışmada, uygun maliyetli l_0 -norm-çevrim içi sansürleme (online censoring, OC)-en küçük ortalama kare (least mean square, LMS) (l_0 -OC-LMS) tabanlı AFC sistemi (l_0 -OC-AFC) önerilmiştir. Tüm veriler yerine yalnızca bilgilendirici verileri işleyerek AF yolunun seyrek sorununu ortadan kaldırır. Böylece önerilen AFC sistemi, performansından ödün vermeden hesap yükünün azaltılmasına önemli ölçüde katkıda bulunur. Bu, OC stratejisi ve seyrekliğe teşvik eden l_0 ceza normunun birleştirilmesiyle elde edilir. Önerilen l_0 -OC-AFC sistemi, kulak arkası işitme cihazından ölçülen gerçek dünyadaki uzun seyrek AF yolları üzerinde yanlış ayarlama (misalignment, MIS) ve eklenmiş sabit kazanç (added stable gain, ASG) açısından kapsamlı bir şekilde test edilmiştir. Benzetim sonuçları önerilen l_0 -OC-AFC sisteminin etkinliğini ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Akustik geri besleme giderici, Çevrim içi sansürleme stratejisi, En küçük kare algoritması, Adaptif filtre, Seyreklik

1 Giriş

İşitme cihazları; yapısında mikrofon, güçlendirici ve hoparlör bulunan ve bireylerin duyma yetisini iyileştirmeyi amaçlayan biyomedikal bir cihazdır ve mikrofon aracılığıyla ortamdaki ses sinyallerini algılar ve ardından bunları güçlendirerek hoparlör vasıtasıyla kullanıcıya ulaştırır. Giyilebilir işitme cihazlarının boyutlarının küçük olması nedeniyle mikrofon ve hoparlör üniteleri birbirine oldukça yakın konumlanmaktadır. Bu durum, güçlendirilmiş sinyalin mikrofon tarafından yeniden yakalanma olasılığını önemli oranda artırmaktadır. İstenmeyen bir durum olarak karşımıza çıkan güçlendirilmiş sinyalin mikrofon tarafından yeniden yakalanması olayı akustik geri besleme (acoustic feedback, AF) olarak adlandırılmaktadır. Kulakta uğultuya sebebiyet

Abstract

One of the important problems encountered in acoustic feedback canceller (AFC) systems is the AF path has a sparse nature. This situation deteriorates the convergence rate and steady-state error of AFC systems. On the other hand, large-scale source signals such as speech/music and using high filter orders increase the computational cost of AFC systems. To this end, in this study, a cost-effective l_0 -norm-online censoring (OC)-least mean square (LMS) (l_0 -OC-LMS) based AFC system (l_0 -OC-AFC) is proposed, which solves the sparse problem of the AF path by processing only informative data instead of all the data. Thus, the proposed AFC system significantly contributes to reducing the computational complexity without sacrificing its performance. This is achieved by combining the OC strategy and the l_0 penalty norm promoting sparsity. The proposed l_0 -OC-AFC system is comprehensively tested in terms of the misalignment (MIS) and the added stable gain (ASG) on real-world long sparse AF paths measured from a behind-the-ear hearing aid. Simulation results reveal the effectiveness of the proposed l_0 -OC-AFC system.

Keywords: Acoustic feedback canceller, Online censoring strategy, Least mean square algorithm, Adaptive filter, Sparsity

veren AF aynı zamanda giyilebilir işitme cihazını kararsızlığa sürükleyerek cihazın gereğinden fazla güç harcamasına neden olmaktadır [1, 2].

Literatürde AF giderici olarak adaptif filtre tabanlı yaklaşımlar ön plana çıkmaktadır [3]. Adaptif filtre tabanlı AFC sistemlerinde temel amaç, AF yolunun kestirimini yapmak ve ardından kestirilmiş AF yolunu mikrofon sinyalinden çıkararak AF etkisinin giderildiği temiz sinyali elde etmektir [3]. Adaptif filtre tabanlı klasik bir AFC'nin blok şeması Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1'de; $s(n)$, $f(n)$, $d(n)$, $y(n)$, $e(n) = d(n) - y(n)$ ve $x(n)$ sırasıyla kaynak ses sinyalini, AF sinyalini, mikrofon çıkış sinyalini, kestirilmiş AF sinyalini, hata sinyalini ve adaptif filtre giriş sinyalini/hoparlör sinyalini temsil eder. Şekil 1'de

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: yusuferen@erciyes.edu.tr (Y. Eren)

Geliş / Received: 21.07.2024 Kabul / Accepted: 19.09.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

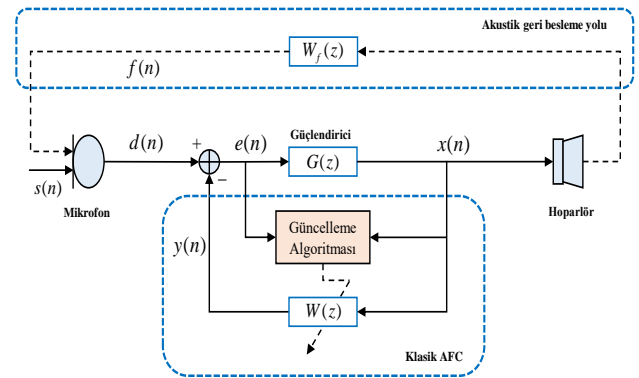
doi: 10.28948/ngumuh.1519986

gösterildiği üzere AF sinyali mikrofonu AF yolu olarak adlandırılan yol üzerinden döner ve $W_f(z)$ AF yolunun transfer fonksiyonunu gösterir. Buna ek olarak, $G(z)$ güçlendirici transfer fonksiyonunu ve $W(z)$ adaptif sonlu dürtü cevaplı (finite impulse response, FIR) filtrenin transfer fonksiyonunu ifade eder. Şekilden de görüldüğü üzere adaptif FIR filtre ağırlık vektörü $\mathbf{w}(n) = [w_0(n), w_1(n), \dots, w_{M-1}(n)]^T$ bir güncelleme algoritması tarafından adaptif olarak güncellenir. Literatürde güncelleme algoritması olarak basit hesap yükü ve gürbüz çalışabilirliği açısından en küçük ortalama kare (least mean square, LMS) algoritmasının ve farklı versiyonlarının kullanımı ön plana çıkmaktadır [1-14].

AF yolu seyrek bir doğaya sahiptir, diğer bir deyişle AF yolu ağırlıkları çoğunlukla sıfırdır veya sıfıra yakındır [3], [4]. Seyreklik, yakınsama hızını ve AFC başarımını olumsuz etkileyen önemli bir sorundur [15]. Klasik adaptif algoritmalar bu durumla baş edemez ve süreç sonunda yakınsama hızının düşük olması kaçınılmazdır [15]. Bu sebeple ağırlık güncelleme işleminde, başarılı bir AFC tasarımı için AF yolunun seyrekliğini dikkate alan algoritmaların kullanımı gereklidir [15]. Bu bağlamda algoritmaların yakınsama hızının iyileştirilmesi ve başarımın artırılması için maliyet fonksiyonlarının yeniden düzenlenmesi gerekir. Bu gereklilik, maliyet fonksiyonuna, algoritmanın seyrekliğe duyarlı olmasına izin veren ceza normu/fonksiyonu adı verilen bir terimin eklenmesiyle giderilir [15]. Bu tekniğe sıfır çekme (zero attraction, ZA) yani sıfıra yakın katsayıların sıfıra doğru getirilmesi veya çekilmesi de denir [3, 4, 15]. AF giderimi aslında bir seyrek sistem tanımlama problemi olarak gözükmektedir. Seyrek sistem tanımlama problemlerinde LMS algoritması, uygulama kolaylığı nedeniyle seyrekliğe duyarlı prosedürlerle birlikte yoğunlukla kullanılmaktadır [15, 16]. Literatürde en sık karşılaşılan LMS tabanlı seyrekliğe duyarlı algoritmalar; l_0 -norm tabanlı LMS (l_0 -LMS) [16], l_1 -norm tabanlı ZA-LMS [15], l_1 -norm tabanlı yeniden ağırlıklandırılmış ZA (reweighted ZA, RZA) [15] algoritmaları olarak dikkat çekmektedir. Literatürde, seyrekliği dikkate alan AFC sistemlerinin, algılanan ses sinyal kalitesinde iyileştirmelerde bulunduğu ve yakınsama başarımını önemli ölçüde geliştirdiği belirtilmiştir [3]. Ayrıca, literatürde orantısız (proportional) öğrenme tabanlı seyrekliğe duyarlı algoritmalar geliştirilerek AFC sisteminin başarımı iyileştirilmiştir [3, 4, 17]. Fakat bu tip orantılı yaklaşımlarda hesaplama karmaşıklığının yüksek olması bu yöntemlerin kullanılabilirliğini düşürmektedir [3]. Bu sebeple orantılı tip algoritmalara göre daha düşük hesaplama maliyeti oluşturmasının yanı sıra kararlı-durum başarımında önemli iyileştirmeler sunması nedeniyle ZA tabanlı yöntemler ön plana çıkmıştır [3]. Bu kapsamda son zamanlarda yapılan bir çalışmada [4], l_1 -normu kullanan iki ayrı ZA ve RZA tabanlı normalize edilmiş LMS (normalized LMS, NLMS) algoritmaları, tahmin hatası yöntemi (prediction error method, PEM) tabanlı dekorelasyon filtresi ile birlikte prob gürültüsü kullanan bir AFC sistemine eklenmiş ve AFC sistemi seyrekliğe duyarlı hale getirilerek

başarım artırılmıştır [4]. AF yolu ağırlıklarının seyrek dağılımını dikkate alan [3]'teki çalışmada, l_0 -norm tabanlı NLMS algoritmasının yanı sıra polinomal ve Versoria yaklaşımlarını kullanan iki ayrı ZA tabanlı NLMS algoritması önerilmiş ve bu yöntemlerin hesaplama yükünü düşürmeye odaklanılmıştır. Literatürde l_0 - ve l_1 -norm tabanlı yöntemlerinin yanı sıra farklı ceza normları da kullanılmaktadır. Örneğin [18]'de, AFC sistemini seyrekliğe duyarlı hale getirmek için l_p -normunu kullanan LMS tabanlı bir yaklaşım önerilmiştir. Burada önerilen yöntemin yakınsama hızını artırdığı vurgulanırken diğer orantılı LMS ve NLMS tabanlı algoritmalara göre daha iyi sonuçların elde edildiği belirtilmiştir [18]. Bunun haricinde, değişken adım boyutuna sahip bir AFC sisteminin sunulduğu [19]'da yazarlar, sistemin seyrekliğe teşvik edildiği takdirde başarımını arttırdığını belirtmiştir.

AFC sistemlerinde konuşma/müzik gibi büyük-ölçekli kaynak sinyallerinin ve yüksek filtre derecelerinin sistemi hesaplama yükü açısından olumsuz etkileyeceği aşikardır. Özellikle giyilebilir işitme cihazlarının AF giderimi gibi prosedürlerini bir çip üzerinden gerçek-zamanlı olarak gerçekleştirdiği düşünüldüğünde, bu durum istenilmeyen bir işlem maliyet çıkarmaktadır. Son yıllarda, AFC sistemleri gibi birçok gerçek-zamanlı uygulamalarda, depolama gereksinimlerini ve işlem maliyetini önemli ölçüde azaltma gibi konularda önemli faydalar sağlayan çevrim içi sansürleme (online censoring, OC) stratejisinin [20] kullanımı ağırlık kazanmıştır [20-29]. OC stratejisi, bir sansürleme kuralı aracılığıyla mevcut verileri anlık olarak bilgilendirici veya bilgilendirici olmayan şekilde kategorize edebilmektedir [20]. Adaptif bir filtre yapısına entegre edildiğinde, veriler çevrim içi olarak bilgilendirici şekilde etiketlendiyse, adaptif algoritma bu verileri ağırlık vektörünü güncelleme aşamasında kullanır, aksi durumda ise bilgilendirici olmayan olarak etiketlenen veriler herhangi bir işlemde kullanılmadan sansürlenir. Böylelikle, başarımı koruyarak veri işleme maliyetinde önemli ölçüde azaltma yapılabilmektedir. Bu açıdan OC stratejisi, birçok mühendislik uygulamasında kendisine yer edinmiştir. Örneğin [24]'te klasik AFC sistemlerinin hesap yükünü azaltmak amacıyla OC-LMS tabanlı bir AFC sistemi önerilmiştir. Burada, OC stratejisini işlem maliyetini azaltmasının yanı sıra başarımı da gözle görülür derecede artırmıştır.



Şekil 1. Klasik AFC sistemi

Buna ek olarak, [25] ve [26]'da araştırmacılar, klasik AFC sistemlerinin muzdarip olduğu yanlılık problemini daha düşük maliyetle ortadan kaldırmak için önerdikleri sistemlere OC stratejisini entegre etmişlerdir. [24-26]'da yer alan çalışmalarda hesap maliyeti ve sistem başarımı açısından önemli katkılar yapılmasına rağmen AFC sistemlerinin yakınsama başarımını olumsuz etkileyen seyreklik problemi üzerinde durulmamıştır. Bu nedenle bu çalışmada, AF yolunun seyrekliğinin yol açtığı kötü yakınsama başarımına uygun maliyetli bir çözüm sunmak amacıyla l_0 -norm tekniği ile OC stratejisinin birlikte kullanıldığı l_0 -norm-OC-LMS (l_0 -OC-LMS) tabanlı AFC sistemi (l_0 -OC-AFC) önerilmiştir. Önerilen sistemin başarımı kulak arkası tipi işitme cihazından ölçülmüş, iki farklı uzun seyrek AF yolları üzerinde test edilmiştir. Önerilen sistem ayrıca, literatürdeki klasik LMS tabanlı AFC sistemi (AFC), OC-LMS tabanlı AFC sistemi (OC-AFC) ve l_0 -norm-LMS (l_0 -LMS) tabanlı AFC (l_0 -AFC) sistemleri ile yanlış ayarlama (misalignment, MIS) ve eklenmiş sabit kazanç (added stable gain, ASG) başarımları üzerinden karşılaştırılmıştır. Benzetim çalışmaları sonucunda, l_0 -OC-AFC sisteminin diğer sistemlerden genel olarak daha iyi başarımlar sergilediği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, l_0 -OC-AFC sistemi, OC stratejisinin ve seyrekliğe duyarlı ceza normlarının uyumlu ve etkin bir şekilde çalışabileceğini ortaya koymuştur.

2 Önerilen l_0 -OC-LMS algoritması tabanlı AFC sistemi

Bu bölümde, seyrek akustik geri besleme yolunun uygun maliyetli kestirimi için l_0 -OC-LMS algoritması tabanlı AFC sisteminin tasarımı detaylı olarak sunulacaktır. Bu kapsamda, ilk olarak l_0 -OC-LMS algoritması türetilen ve ardından AFC sistemine nasıl adapte edildiği sunulacaktır.

Seyreklik probleminin üstesinden gelmek için önerilen l_0 -OC-LMS algoritmasının tasarımında, klasik seyrekliğe duyarlı maliyet fonksiyonu $J_{l_0}(n) = |e(n)|^2 + \gamma \|\mathbf{w}(n)\|_0$ 'nun yerine aşağıdaki maliyet fonksiyonu kullanılmaktadır:

$$J_{l_0}(n)^{(\tau)} := \begin{cases} \frac{1}{2}(e^2(n) - \tau^2 \sigma_v^2) + \gamma \|\mathbf{w}(n)\|_0, & \text{eğer } |e(n)| \geq \tau \sigma_v \\ 0, & \text{eğer } |e(n)| < \tau \sigma_v \end{cases} \quad (1)$$

burada $\|\cdot\|_0$ ifadesi l_0 -normunu, $\gamma > 0$ bir sonraki ceza unsuru ile kestirim hatası arasındaki korelasyon derecesini ayarlamak için kullanılan parametreyi, $\mathbf{w}(n)$ ise ağırlık vektörünü temsil etmektedir. Aslında burada l_0 -norm, ağırlık vektörü $\mathbf{w}(n)$ 'nin içerdiği sıfırdan farklı katsayıların sayısını ölçer [16]. Denklem (1)'de, $\|\mathbf{w}(n)\|_0$ ifadesi maliyet fonksiyonu $J_{l_0}(n)^{(\tau)}$ 'nin ağırlık vektörü $\mathbf{w}(n)$ 'ye göre minimizasyonu zorlaştırır. Bu yüzden, literatürde l_0 -norm

genellikle aşağıda verilen sürekli fonksiyonla yaklaşık olarak hesaplanır [16]:

$$\|\mathbf{w}(n)\|_0 \approx \sum_{i=0}^{M-1} (1 - e^{-\theta |w_i(n)|}), \quad i = 0, 1, \dots, M-1 \quad (2)$$

burada θ pozitif bir sabiti temsil eder.

Denklem (2)'deki yaklaşım Denklem (1)'de yerine konularak, seyrekliğe duyarlı maliyet fonksiyonu $J_{l_0}(n)^{(\tau)}$ aşağıdaki gibi yeniden yazılır:

$$J_{l_0}(n)^{(\tau)} := \begin{cases} \frac{1}{2}(e^2(n) - \tau^2 \sigma_v^2) + \gamma \sum_{i=0}^{M-1} (1 - e^{-\theta |w_i(n)|}), & \text{eğer } |e(n)| \geq \tau \sigma_v \\ 0, & \text{eğer } |e(n)| < \tau \sigma_v. \end{cases} \quad (3)$$

Ardından, [20, 21, 24-26]'daki çalışmalarda olduğu gibi, yeni maliyet fonksiyonu $J_{l_0}(n)^{(\tau)}$, ağırlık vektörü $\mathbf{w}(n)$ 'ye göre minimize edilerek önerilen l_0 -OC-LMS algoritmasının güncelleme kuralı aşağıdaki gibi elde edilir:

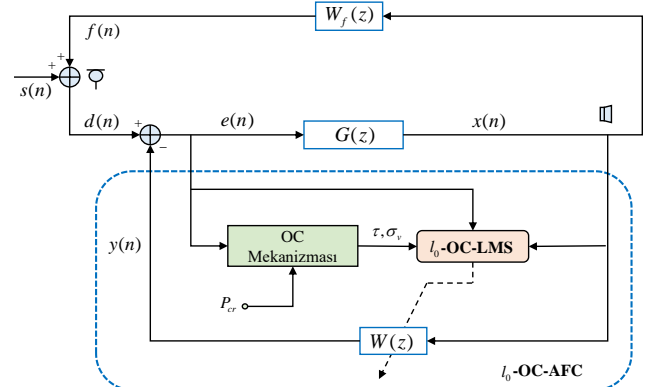
$$\mathbf{w}(n+1) := \begin{cases} \mathbf{w}(n) + \mu \mathbf{x}(n)e(n) - \kappa \theta \text{sgn}(\mathbf{w}(n)) e^{-\theta |\mathbf{w}(n)|}, & \text{eğer } |e(n)| \geq \tau \sigma_v \\ 0, & \text{eğer } |e(n)| < \tau \sigma_v \end{cases} \quad (4)$$

burada $\kappa = \mu \gamma$ 'dır ve $\text{sgn}(\cdot)$ ifadesi aşağıdaki gibi işaret fonksiyonunu temsil eder:

$$\text{sgn}(\lambda) = \begin{cases} \frac{\lambda}{|\lambda|}, & \text{eğer } \lambda \neq 0 \\ 0, & \text{aksi durumda.} \end{cases} \quad (5)$$

Denklem (4)'te yer alan güncelleme kuralının son terimindeki üstel terim, önerilen algoritmada yüksek hesaplama karmaşıklığına neden olur. Bu nedenle üstel fonksiyon birinci-dereceden Taylor serisi kullanılarak aşağıdaki gibi basite indirgenir [16]:

$$e^{-\theta |\mathbf{w}(n)|} \approx \begin{cases} 1 - \theta |\mathbf{w}(n)|, & \text{eğer } \mathbf{w}(n) \leq \frac{1}{\theta} \\ 0, & \text{aksi durumda.} \end{cases} \quad (6)$$



Şekil 2. Önerilen l_0 -OC-AFC sisteminin blok şeması

Üstel terim her zaman pozitif olduğundan, Denklem (6)'daki yaklaşım her zaman pozitiftir. Bu yaklaşım dikkate alınarak, Denklem (4)'te önerilen l_0 -OC-LMS algoritmasının güncelleme kuralı şu hale gelir [16]:

$$\mathbf{w}(n+1) := \begin{cases} \mathbf{w}(n) + \mu \mathbf{x}(n)e(n) - \kappa \theta \operatorname{sgn}(\mathbf{w}(n)) f_\theta(\mathbf{w}(n)), & \text{eğer } |e(n)| \geq \tau \sigma_v \\ 0, & \text{eğer } |e(n)| < \tau \sigma_v \end{cases} \quad (7)$$

burada

$$f_\theta(\mathbf{w}(n)) \approx \begin{cases} \theta^2 \mathbf{w}(n) + \theta, & \text{eğer } -\frac{1}{\theta} \leq \mathbf{w}(n) < 0 \\ \theta^2 \mathbf{w}(n) - \theta, & \text{eğer } 0 < \mathbf{w}(n) \leq \frac{1}{\theta} \\ 0, & \text{aksi durumda.} \end{cases} \quad (8)$$

Ayrıca Denklem (7)'deki güncelleme kuralı aşağıda sunulan alternatif form ile daha basit bir şekilde gösterilebilir [30]:

$$\mathbf{w}(n+1) := \begin{cases} \mathbf{w}(n) + \mu \mathbf{x}(n)e(n) - \mathbf{f}_0(n), & \text{eğer } |e(n)| \geq \tau \sigma_v \\ 0, & \text{eğer } |e(n)| < \tau \sigma_v \end{cases} \quad (9)$$

ve

$$\mathbf{f}_0(n) = \kappa \theta \operatorname{sgn}(\mathbf{w}(n)) .* (1 - \theta |\mathbf{w}(n)|) \quad (10)$$

burada .* eleman-eleman çarpımını temsil eder. Ayrıca, Denklem (9)'da yer alan τ ve σ_v nicelikleri sırasıyla sansürleme eşik seviyesini ve ölçüm gürültüsünün standart

sapmasını temsil eder ve sırasıyla Denklem (11) ve Denklem (12) yardımıyla hesaplanır [20, 21].

$$\tau \approx Q^{-1} \left(\frac{1 - P_{cr}}{2} \right) \quad (11)$$

burada Q^{-1} ve $P_{cr} = \frac{K-p}{K}$ sırasıyla tamamlayıcı kümülatif dağılım fonksiyonunun tersini ve ortalama sansürleme oranını temsil ederken, K ve p sırasıyla toplam veri sayısını ve bilgilendirici veri sayısını temsil eder.

$$\sigma_v^2(n) = \beta \sigma_v^2(n-1) + (1 - \beta) |e(n)|^2 \quad (12)$$

burada $\beta \in (0,1)$ unutm faktörünü temsil etmektedir.

Son olarak, Şekil 2 ve Tablo 1'den görüldüğü üzere, önerilen l_0 -OC-LMS algoritması AFC sistemine başarılı bir şekilde entegre edilerek, l_0 -OC-LMS tabanlı AFC sistemi (l_0 -OC-AFC) tasarlanmıştır. Sonuç olarak, OC mekanizmasının l_0 -norm tabanlı maliyet fonksiyonun içerisinde yerleştirilmesiyle, l_0 -OC-AFC sistemi sadece bilgilendirici verileri kullanarak hem seyreklik probleminin üstesinden gelme hem de AFC sistemlerinde maliyeti önemli ölçüde azaltma yeteneğine sahiptir.

3 Benzetim sonuçları ve tartışma

Bu bölümde önerilen l_0 -OC-AFC sisteminin başarımı, literatürde yer alan klasik AFC [31], l_0 -AFC [3] ve OC-AFC [24] sistemleri ile karşılaştırılarak detaylı olarak analiz edilmiştir. Burada l_0 -OC-AFC ve OC-AFC sistemleri için $P_{cr} = \%30$, $\%50$ ve $\%70$ gibi farklı sansürleme oranlarında seçilerek bilgilendirici olmayan veriler

Tablo 1. l_0 -OC-AFC sisteminin sözde kodu

Parametreler: $\mu, M, G, \Delta, 0 < \beta < 1, \theta$ ve γ

Başlangıç Koşulları: $\mathbf{w} = \mathbf{0}, \tau = Q^{-1} \left(\frac{1 - P_{cr}}{2} \right), P_{cr} = \frac{K-p}{K}, \sigma_v(0) = 0$ ve $\mathbf{f}_0 = \mathbf{0}$

Veri: $\{s(n)\}_{n=1}^L$

Döngü: $n = 1, 2, \dots, L$

$$y(n) = \mathbf{w}^T(n) \mathbf{x}(n)$$

$$f(n) = \mathbf{w}_f^T(n) \mathbf{x}(n)$$

$$d(n) = s(n) + f(n)$$

$$e(n) = d(n) - y(n) = s(n) + \mathbf{w}_f^T(n) \mathbf{x}(n) - \mathbf{w}^T(n) \mathbf{x}(n)$$

$$x(n) = G(z)e(n) = Ge(n - \Delta)$$

$$\sigma_v^2(n) = \beta \sigma_v^2(n-1) + (1 - \beta) |e(n)|^2$$

$$\mathbf{f}_0(n) = \kappa \theta \operatorname{sgn}(\mathbf{w}(n)) .* (1 - \theta |\mathbf{w}(n)|)$$

$$\mathbf{w}(n+1) := \begin{cases} \mathbf{w}(n) + \mu \mathbf{x}(n)e(n) - \mathbf{f}_0(n), & \text{eğer } |e(n)| \geq \tau \sigma_v \\ \mathbf{w}(n), & \text{aksi durumda} \end{cases}$$

bitiş

sansürlenirken, klasik AFC ve l_0 -AFC sistemleri verilerin tamamını kullanmıştır. İlgili sistemlere ait başarımlar, literatürde yaygın kullanılan MIS ve ASG açısından frekans düzleminde değerlendirilmiştir. Bilindiği üzere **Denklem (13)**'te yer alan MIS (dB) ifadesi bir AFC sisteminin geri besleme yolunu ne kadar doğru kestirdiğini ölçerken, **Denklem (14)**'te yer alan ASG ifadesi cihazın çalışma süresi boyunca tasarruf ettiği güç miktarını ölçer [3, 4, 24].

$$\text{MIS (dB)} = 10 \log_{10} \left[\frac{\sum_{k=0}^{M_f} |W_f(e^{j\omega_k}) - W(e^{j\omega_k})|^2}{\sum_{k=0}^{M_f} |W_f(e^{j\omega_k})|^2} \right] \quad (13)$$

$$\text{ASG (dB)} = 20 \log_{10} \left[\min_{\omega} \frac{1}{|W_f(e^{j\omega_k}) - W(e^{j\omega_k})|} \right] - 20 \log_{10} \left[\min_{\omega} \frac{1}{|W_f(e^{j\omega_k})|} \right]. \quad (14)$$

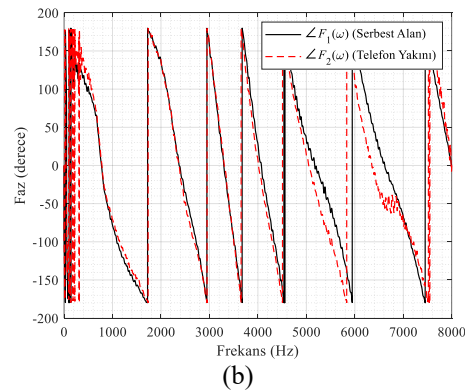
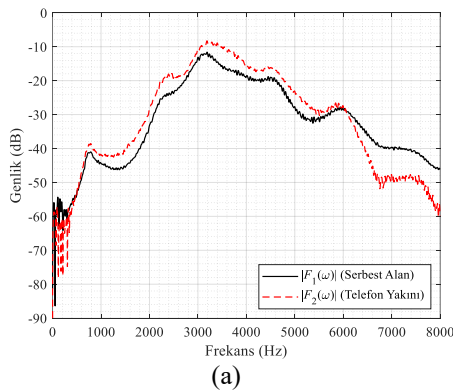
Yukarıdaki denklemlerde ω ifadesi açısal frekans sembolize ederken, M_f ifadesi frekans örneklerinin sayısını gösterir.

Benzetim çalışmaları, kulak arkası (behind the ear, BTE) tipi bir işitme cihazından ölçülen iki adet gerçek-dünya uzun seyrek AF yolu üzerinde gerçekleştirilmiştir [32]. Bunlar sırasıyla, serbest alan AF yolu $F_1(\omega)$ ve telefonun cihaza yaklaştırıldığı AF $F_2(\omega)$ yoludur. $F_1(\omega)$ mikrofon ile hoparlör arasında herhangi bir engel olmadığında ölçülen AF yoluken, $F_2(\omega)$ ise telefonun kulağa yakın olduğunda ölçülen AF yoludur [32]. İlgili AF yolları ilk olarak 16 kHz örnekleme frekansıyla yeniden örneklenmiştir ve ardından ilk 500 ağırlık katsayısı benzetimlerde kullanılmıştır. Bu AF yollarına ait genlik ve faz cevapları **Şekil 3**'te sunulmuştur. Kaynak sinyali olarak ise 16 kHz'de örneklenmiş konuşma ve müzik sinyalleri kullanılmıştır [10, 33]. Başarılı bir AFC tasarımı için, güçlendirici yapısı içerisinde yeterli düzeyde bir gecikme sağlanmalıdır [34]. Bu doğrultuda çalışmada kullanılan AF yollarının uzun olması nedeniyle gecikme miktarı oldukça yüksek ayarlanmış ve güçlendirici transfer

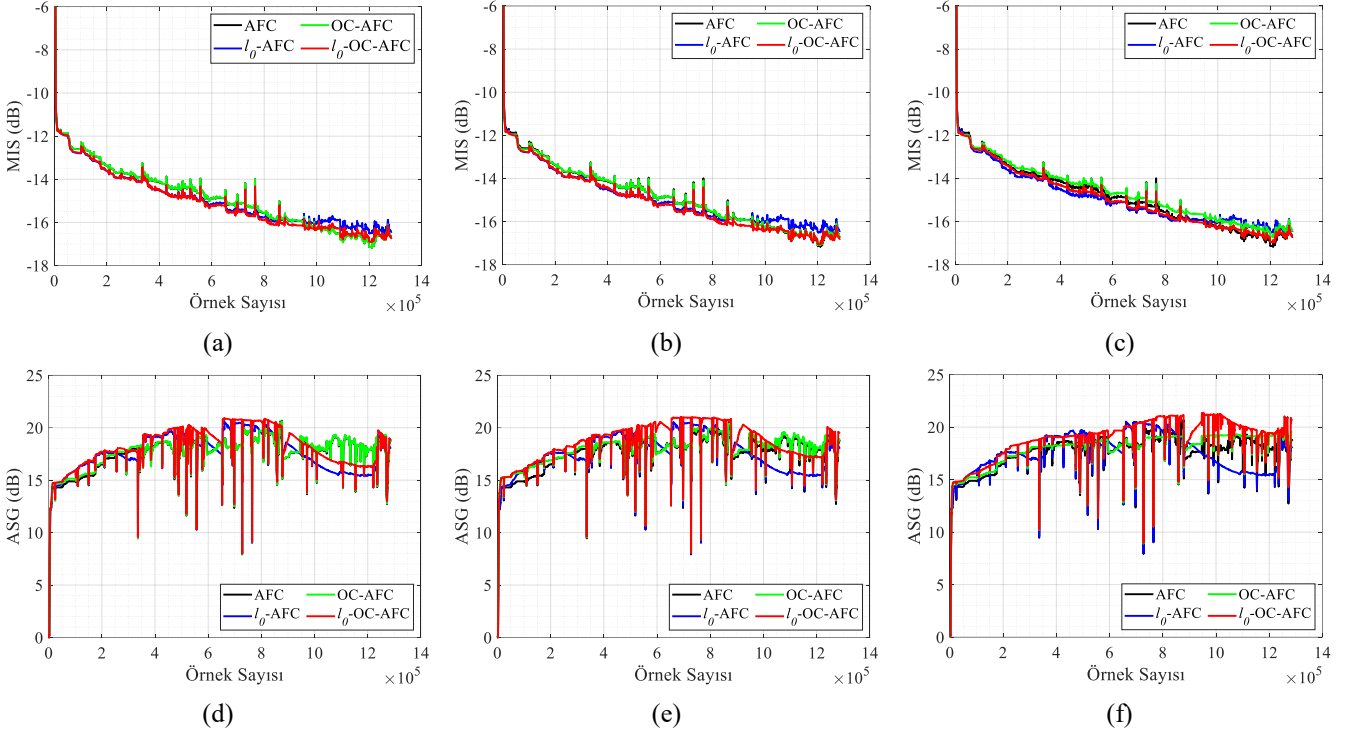
fonksiyonu $G(z) = 20z^{-498}$ olarak tercih edilmiştir. Son olarak ise en iyi sonuçları elde etmek için sistemlerin parametreleri deneysel olarak $M = 500$, $M_f = 512$, $\mu = 0.000003$, $\beta = 0.9$ ve $\gamma = 0.001$ olacak şekilde ayarlanmıştır.

Şekil 4 ve **5**'te $F_1(\omega)$ için kaynak sinyalinin konuşma ve müzik sinyali olduğu durumlardaki MIS ve ASG başarımları sırasıyla sunulmuştur. **Şekil 6** ve **7**'de ise $F_2(\omega)$ için kaynak sinyalinin konuşma ve müzik sinyali olduğu durumlardaki MIS ve ASG başarımları sırasıyla verilmiştir. Başarım grafikleri incelendiğinde, her iki kaynak sinyal için de önerilen l_0 -OC-AFC ve klasik l_0 -AFC sistemlerinin, kendilerinin seyrekliğe duyarsız versiyonlarına göre genelde daha iyi MIS (dB) ve ASG (dB) değerleri ürettiği görülmektedir. Bununla birlikte, **Şekil 4** ve **5**'ten görülebileceği üzere, $F_1(\omega)$ için hem konuşma hem de müzik sinyalleri altında tüm P_{cr} değerleri için, önerilen l_0 -OC-AFC sistemi diğer sistemlere göre daha düşük MIS (dB) ve daha yüksek ASG (dB) sonuçları üretmiştir. Burada ayrıca önerilen l_0 -OC-AFC sisteminin MIS ve ASG başarımlarının P_{cr} artışıyla birlikte gözle görülür şekilde artması dikkat çekmektedir. Benzer şekilde **Şekil 6** ve **7**'de, $F_2(\omega)$ için her iki kaynak sinyali altında önerilen l_0 -OC-AFC sistemi diğer sistemlere göre daha düşük MIS (dB) ve daha yüksek ASG (dB) değerleri üreterek üstün başarımını korumuştur.

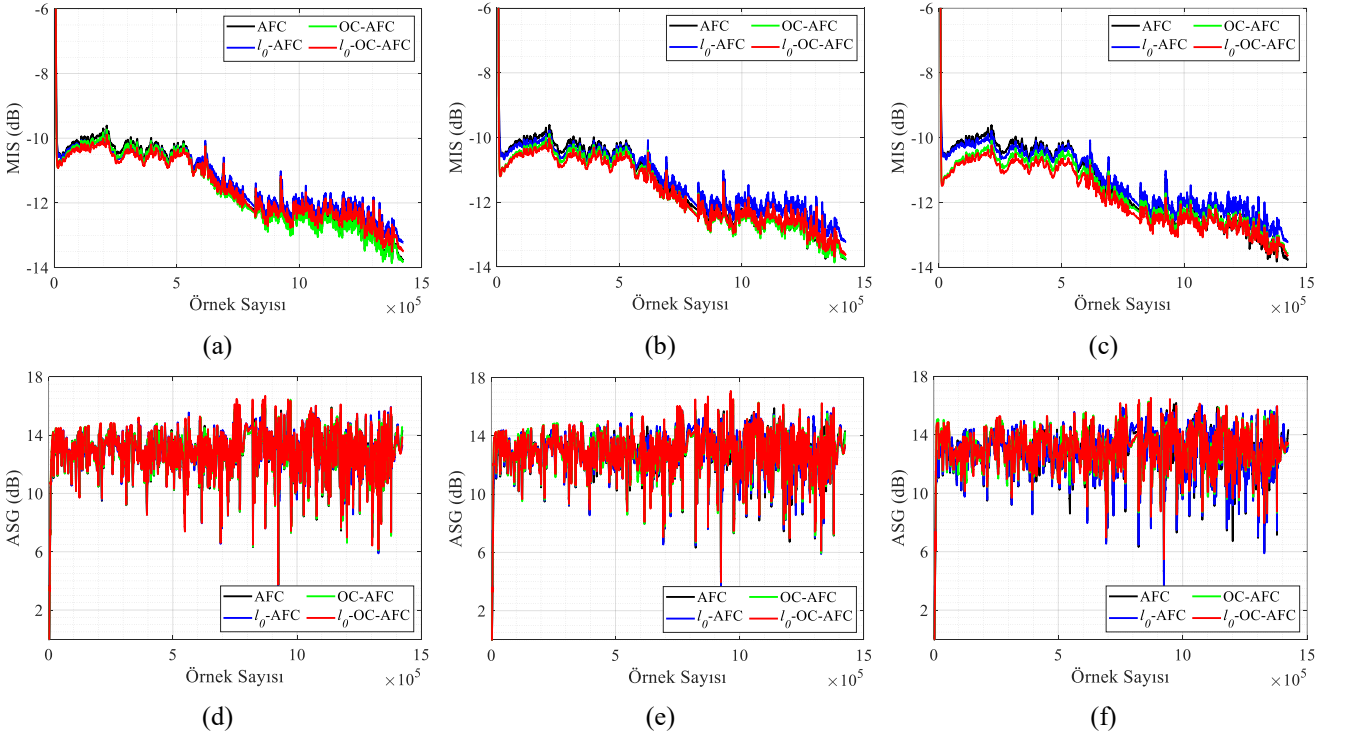
Grafiksel sonuçlara ek olarak, önerilen sistemin etkinliğini daha açığa çıkarmak amacıyla sistemlerin kestirilmiş sansürleme oranı \hat{P}_{cr} , ortalama MIS ve ASG değerleri **Tablo 2**'de özetlenmiştir. **Tablo 2**'den elde edilen ilk çıkarım; \hat{P}_{cr} 'lerin, gerçek sansürleme oranları P_{cr} 'lere oldukça yakın olmasıdır. Bu durum OC mekanizmasının önerilen l_0 -OC-AFC sisteminde yüksek doğrulukta çalıştığı önemli bir göstergesidir. Ayrıca **Tablo 2**'de $F_1(\omega)$ ve $F_2(\omega)$ için ortalama MIS (dB) ve ASG (dB) verileri dikkate alındığında, l_0 -OC-AFC sisteminin genel olarak tüm P_{cr} 'lerde diğer sistemlere yakın veya daha iyi başarım gösterdiği gözlemlenmiştir.



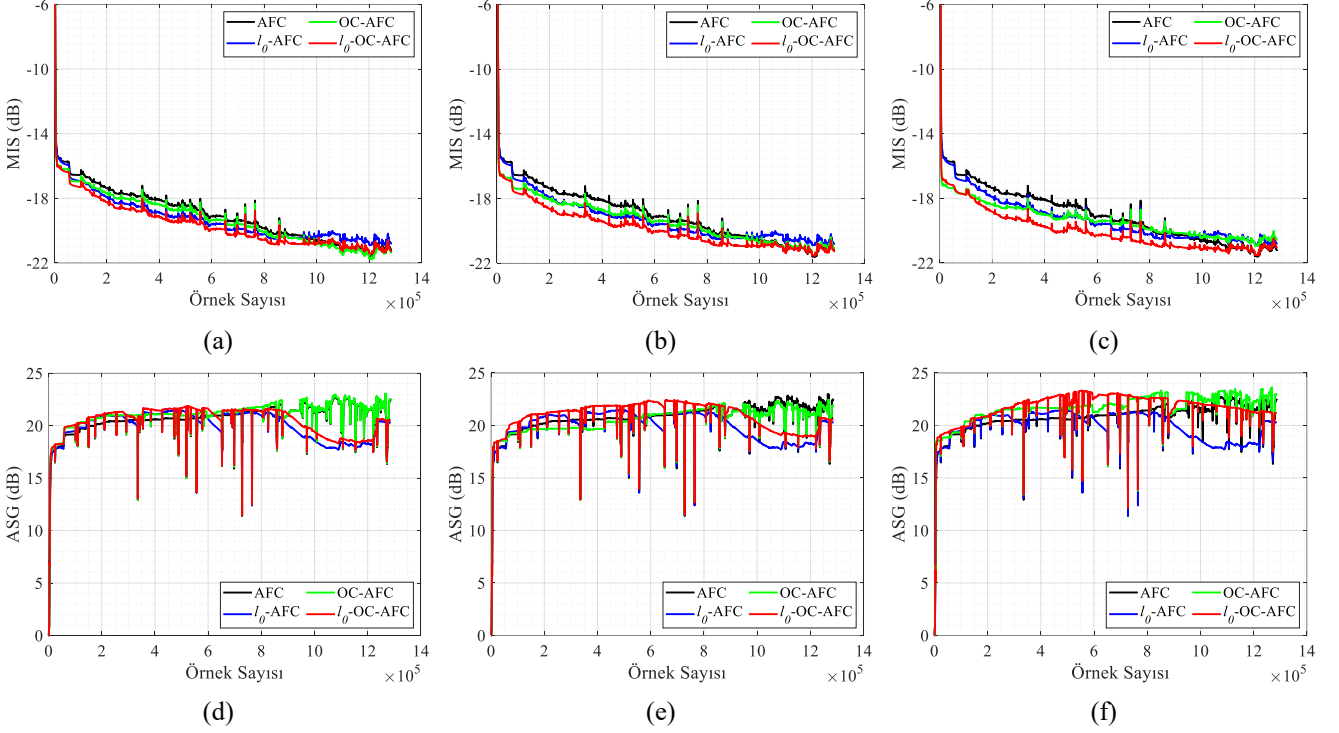
Şekil 3. AF yollarının (a) genlik cevapları, (b) faz cevapları



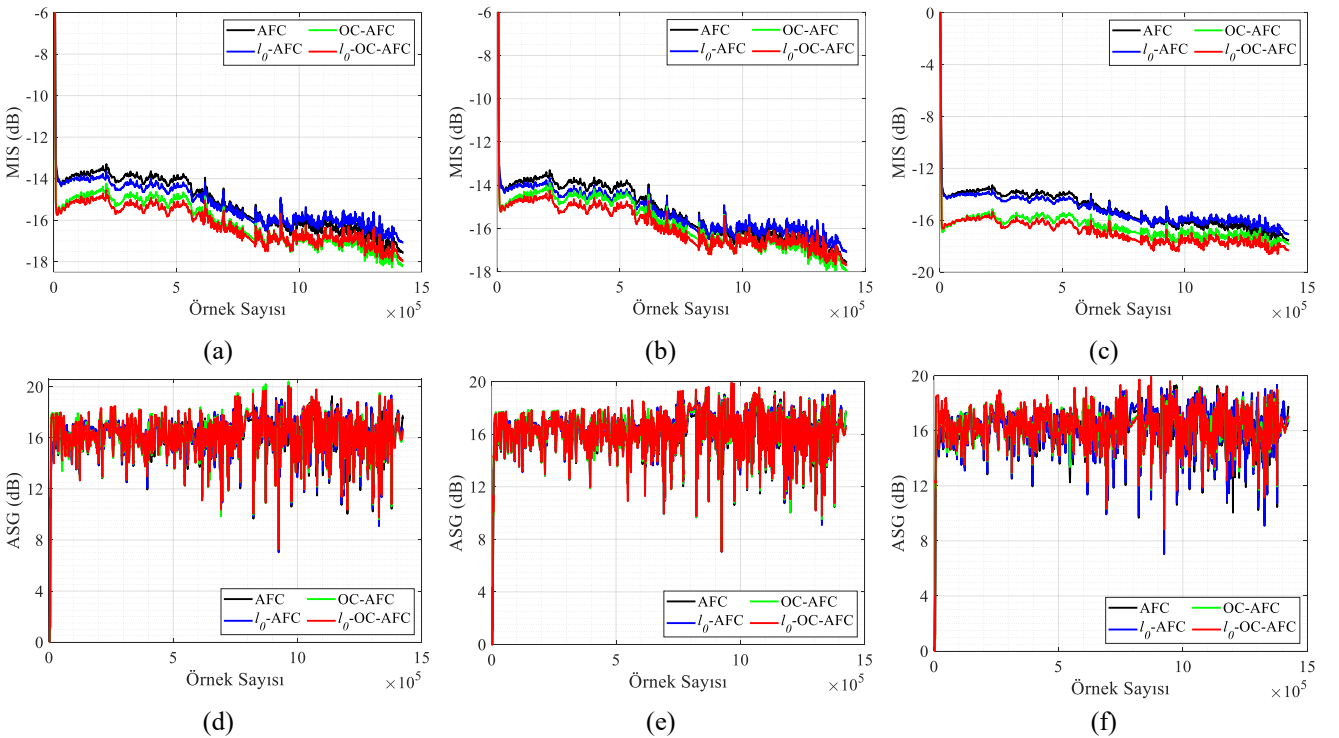
Şekil 4. Konuşma sinyali altında $F_1(\omega)$ için sistemlerin (a) $P_{cr} = \%30$ için MIS başarımı, (b) $P_{cr} = \%50$ için MIS başarımı, (c) $P_{cr} = \%70$ için MIS başarımı (d) $P_{cr} = \%30$ için ASG başarımı, (e) $P_{cr} = \%50$ için ASG başarımı, (f) $P_{cr} = \%70$ için ASG başarımı



Şekil 5. Müzik sinyali altında $F_1(\omega)$ için sistemlerin (a) $P_{cr} = \%30$ için MIS başarımı, (b) $P_{cr} = \%50$ için MIS başarımı, (c) $P_{cr} = \%70$ için MIS başarımı (d) $P_{cr} = \%30$ için ASG başarımı, (e) $P_{cr} = \%50$ için ASG başarımı, (f) $P_{cr} = \%70$ için ASG başarımı



Şekil 6. Konuşma sinyali altında $F_2(\omega)$ için sistemlerin (a) $P_{cr} = \%30$ için MIS başarımı, (b) $P_{cr} = \%50$ için MIS başarımı, (c) $P_{cr} = \%70$ için MIS başarımı (d) $P_{cr} = \%30$ için ASG başarımı, (e) $P_{cr} = \%50$ için ASG başarımı, (f) $P_{cr} = \%70$ için ASG başarımı.



Şekil 7. Müzik sinyali altında $F_2(\omega)$ için sistemlerin (a) $P_{cr} = \%30$ için MIS başarımı, (b) $P_{cr} = \%50$ için MIS başarımı, (c) $P_{cr} = \%70$ için MIS başarımı (d) $P_{cr} = \%30$ için ASG başarımı, (e) $P_{cr} = \%50$ için ASG başarımı, (f) $P_{cr} = \%70$ için ASG başarımı

Tablo 2. Kestirilmiş sansürleme oranları, ortalama MIS ve ASG değerleri

Sistem	Kaynak Sinyal	$F_1(\omega)$ - Serbest Alan			$F_2(\omega)$ - Telefon Yakını		
		\hat{P}_{cr} (%)	MIS (dB)	ASG (dB)	\hat{P}_{cr} (%)	MIS (dB)	ASG (dB)
AFC	Konuşma	-	-14.8188	17.5888	-	-18.9942	20.7139
	Müzik	-	-11.4530	12.7913	-	-15.1740	16.0850
l_0 -AFC	Konuşma	-	-14.8852	17.5201	-	-19.2366	19.8749
	Müzik	-	-11.2987	12.8337	-	-15.2069	16.1340
OC-AFC ($P_{cr} = \%30$)	Konuşma	21.5602	-14.8174	17.6765	21.4917	-19.2465	21.0268
	Müzik	21.8652	-11.5399	12.8129	21.8694	-15.6858	16.1375
OC-AFC ($P_{cr} = \%50$)	Konuşma	38.6752	-14.8180	17.8945	38.5980	-19.3356	20.4900
	Müzik	39.5167	-11.6230	12.8075	39.4873	-16.0539	16.1716
OC-AFC ($P_{cr} = \%70$)	Konuşma	64.9596	-14.6208	17.9164	64.9294	-19.3298	21.5722
	Müzik	63.8011	-11.6442	12.9832	63.7747	-16.5067	16.2764
l_0 -OC-AFC ($P_{cr} = \%30$)	Konuşma	21.4707	-15.0071	18.1094	21.4522	-19.5950	20.3638
	Müzik	21.8872	-11.4692	12.8327	21.8628	-15.8389	16.1452
l_0 -OC-AFC ($P_{cr} = \%50$)	Konuşma	38.5379	-15.0395	18.5565	38.4595	-19.7984	20.8403
	Müzik	39.5350	-11.6330	12.8559	39.5123	-16.1574	16.1774
l_0 -OC-AFC ($P_{cr} = \%70$)	Konuşma	64.9628	-14.9170	18.9012	64.9215	-19.9719	21.6578
	Müzik	63.7915	-11.7865	13.0051	63.7314	-16.9476	16.2920

Grafiksel sonuçlara benzer şekilde, önerilen sistemin P_{cr} artışından olumlu yönde etkilendiği **Tablo 2**'den de açıkça görülmektedir. Ayrıca önerilen l_0 -OC-AFC sistemi en iyi başarımlarına $P_{cr} = \%70$ seçildiğinde ulaşmıştır. Bu da önerilen l_0 -OC-AFC sisteminin, seyrekliğe-duyarlılık ve yalnızca bilgilendirici veri kullanımı gibi yetenekleri sayesinde, verilerin yalnızca %30 'luk kısmını kullanarak diğer sistemlerden daha üstün başarımlar sergilediğini kanıtlamıştır.

4 Sonuç

Bu çalışmada, AF yolunun seyrek doğasını dikkate alan ve yalnızca bilgilendirici verileri işleyen, uygun maliyetli l_0 -OC-AFC sistemi önerilmiştir. Önerilen sistem, seyrekliği teşvik etmek için l_0 ceza normunu kullanırken OC stratejisiyle uygun maliyet hedefine ulaşmıştır. Önerilen l_0 -OC-AFC sistemi, BTE tipi bir işitme cihazından ölçülen gerçek dünyadaki uzun seyrek AF yolları üzerinde MIS ve ASG açısından test edilmiştir. Benzetim sonuçları, önerilen l_0 -OC-AFC sisteminin seyrekliğe duyarlı olmasından dolayı yakınsama başarımını artırdığını ve eş zamanlı olarak yalnızca bilgilendirici verilerle çalışabilme yeteneği

sayesinde hesaplama yükünü de azalttığını göstermiştir. Ayrıca önerilen sistemin sansürleme oranının artmasıyla doğru orantılı olarak başarımını da artırdığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, önerilen l_0 -OC-AFC sistemi, OC stratejisinin ve seyrekliğe duyarlı ceza normlarının uyumlu ve etkin bir şekilde çalışabileceğini ortaya koymuştur. İlerleyen çalışmalarda, OC stratejisinin lineer olmayan adaptif filtrele entegre edilmesiyle AF yolu dürtü cevaplarının ve kaynak sinyallerinin lineer olmayan dinamiklerinin de dikkate alınması mümkün olacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma, Kayseri Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FBA-2022-1094 kodlu proje ile kısmen desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %16

Kaynaklar

- [1] R. Vanamadi and A. Kar, Feedback cancellation in digital hearing aids using convex combination of proportionate adaptive algorithms, Applied Acoustics,

- 182, 108175, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108175>.
- [2] M. G. Siqueira and A. Alwan, Steady-state analysis of continuous adaptation in acoustic feedback reduction systems for hearing-aids, *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 8 (4), 443-453, 2000. <https://doi.org/10.1109/89.848225>.
- [3] S. S. Bhattacharjee, S. Pradhan and N. V. George, Design of a class of zero attraction based sparse adaptive feedback cancellers for assistive listening devices, *Applied Acoustics*, 173, 107683, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107683>.
- [4] S. Pradhan, V. Patel, K. Patel, J. Maheshwari and N. V. George, Acoustic feedback cancellation in digital hearing aids: A sparse adaptive filtering approach, *Applied Acoustics*, 122, 138-145, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.02.018>.
- [5] T. van Waterschoot and M. Moonen, Fifty years of acoustic feedback control: State of the art and future challenges, *Proceedings of the IEEE*, 99 (2), 288-327, 2011. <https://doi.org/10.1109/jproc.2010.2090998>.
- [6] J. M. Kates, Feedback cancellation in hearing aids, *International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Albuquerque (ICASSP), NM, USA*, 1125-1128, 1990. <https://doi.org/10.1109/icassp.1990.116141>.
- [7] J. Hellgren, Analysis of feedback cancellation in hearing aids with Filtered-X LMS and the direct method of closed loop identification, *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 10 (2), 119-131, 2002. <https://doi.org/10.1109/89.985549>.
- [8] G. Rombouts, T. Van Waterschoot, K. Struyve and M. Moonen, Acoustic feedback cancellation for long acoustic paths using a nonstationary source model, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 54 (9), 3426-3433, 2006. <https://doi.org/10.1109/tsp.2006.879251>.
- [9] T. van Waterschoot and M. Moonen, Adaptive feedback cancellation for audio applications, *Signal Processing*, 89 (11), 2185-2201, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2009.04.036>.
- [10] L. Thi, T. Tran and S. E. Nordholm, A switched algorithm for adaptive feedback cancellation using pre-filters in hearing aids, *Audiology Research*, 11 (3), 389-409, 2021. <https://doi.org/10.3390/audiolres11030037>.
- [11] L. T. T. Tran, S. E. Nordholm, H. Schepker, H. H. Dam and S. Doclo, Two-microphone hearing aids using prediction error method for adaptive feedback control, *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, 26 (5), 909-923, 2018. <https://doi.org/10.1109/taslp.2018.2798822>.
- [12] A. Anand, A. Kar and M. N. S. Swamy, Design and analysis of a BLPC vocoder-based adaptive feedback cancellation with probe noise, *Applied Acoustics*, 115, 196-208, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.08.023>.
- [13] E. C. Mengüç and N. Acır, A novel adaptive filter design using Lyapunov stability theory, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 23 (3), 719-728, 2015. <https://doi.org/10.3906/elk-1212-29>.
- [14] E. C. Mengüç and N. Acır, Lyapunov stability theory based adaptive filter algorithm for noisy measurements, *15th International Conference on Computer Modelling and Simulation (UKSim), Cambridge, UK* 451-454, 2013. <https://doi.org/10.1109/uksim.2013.50>.
- [15] Y. Chen, Y. Gu and A. O. Hero, Sparse LMS for system identification, *International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Taipei, Taiwan*, 3125-3128, 2009. <https://doi.org/10.1109/icassp.2009.4960286>.
- [16] Y. Gu, J. Jin and S. Mei, ℓ_0 norm constraint LMS algorithm for sparse system identification, *IEEE Signal Processing Letter*, 16 (9), 774-777, 2009. <https://doi.org/10.1109/lsp.2009.2024736>.
- [17] Vasundhara, N. B. Puhana and G. Panda, Zero attracting proportionate normalized subband adaptive filtering technique for feedback cancellation in hearing aids, *Applied Acoustics*, 149, 39-45, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.12.040>.
- [18] C. H. Lee, B. D. Rao and H. Garudadri, Sparsity promoting LMS for adaptive feedback cancellation, *25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Kos, Greece*, 226-230, 2017. <https://doi.org/10.23919/eusipco.2017.8081202>.
- [19] Vasundhara, G. Panda and N. B. Puhana, A VSS sparseness controlled algorithm for feedback suppression in hearing aids, *International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT)*, 151-156, 2016. <https://doi.org/10.1109/isspit.2015.7394318>.
- [20] D. Berberidis, V. Kekatos and G. B. Giannakis, Online censoring for large-scale regressions with application to streaming big data, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 64 (15), 3854, 2016. <https://doi.org/10.1109/tsp.2016.2546225>.
- [21] E. C. Mengüç, S. Çınar, M. Xiang and D. P. Mandic, Online censoring based weighted-frequency fourier linear combiner for estimation of pathological hand tremors, *IEEE Signal Processing Letter*, 28, 1460-1464, 2021. <https://doi.org/10.1109/lsp.2021.3097279>.
- [22] A. O. Sarp, E. C. Mengüç, M. Peker and B. Çolak Güvenç, Data-adaptive censoring for short-term wind speed predictors based on MLP, RNN, and SVM, *IEEE Systems Journal*, 16 (3), 3625-3634, 2022. <https://doi.org/10.1109/jsyst.2022.3150749>.
- [23] B. Çolak Güvenç, Y. Eren and E. C. Mengüç, Novel online censoring based learning algorithm for complex-valued big data streams, *30th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Safranbolu, Turkey*, 1-4, 2022. <https://doi.org/10.1109/siu55565.2022.9864761>.
- [24] Y. Eren, B. Çolak Güvenç and E. C. Mengüç, Online censoring based acoustic feedback cancellation for wearable hearing aids, *30th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Safranbolu, Turkey*, 1-4, 2022. <https://doi.org/10.1109/siu55565.2022.9864685>.

- [25] Y. Eren, B. Çolak Güvenç and E. C. Mengüç, An acoustic feedback canceler based on probe noise and informative data for hearing aids, *Signal, Image Video and Processing*, 18, 703-714, 2024. <https://doi.org/10.1007/S11760-023-02786-7>.
- [26] Y. Eren, B. C. Guvenc, and E. C. Menguc, Cost-effective acoustic feedback cancellers for digital hearing aids, *IEEE/ACM Transactions Audio, Speech and Language Processing*, 32, 2367-2377, 2024. <https://doi.org/10.1109/taslp.2024.3389644>.
- [27] Y. Eren, B. Çolak Güvenç and E. C. Mengüç, Cost-effective adaptive predictor for large-scale wind signal, 46th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), Prague, Czech Republic, 221-224, 2023. <https://doi.org/10.1109/tsp59544.2023.10197765>.
- [28] B. Çolak Güvenç and E. C. Mengüç, A novel family of online censoring based complex-valued least mean kurtosis algorithms, *Signal Processing*, 216, 109302, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2023.109302>.
- [29] E. C. Mengüç, N. Acir and D. P. Mandic, "A class of online censoring based quaternion-valued least mean square algorithms, *IEEE Signal Processing Letter*, 30, 244-248, 2023, <https://doi.org/10.1109/lsp.2023.3255000>.
- [30] Y. Zhang, S. Xiao, D. Huang, D. Sun, L. Liu and H. Cui, 10 -norm penalised shrinkage linear and widely linear LMS algorithms for sparse system identification, *IET Signal Processing*, 11 (1), 86-94, 2017. <https://doi.org/10.1049/iet-spr.2015.0218>.
- [31] D. K. Bustamante, T. L. Worrall and M. J. Williamson, Measurement and adaptive suppression of acoustic feedback in hearing aids, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 3, 2017-2020, 1989. <https://doi.org/10.1109/icassp.1989.266855>.
- [32] T. Sankowsky-Rothe, M. Blau, H. Schepker and S. Doclo, Reciprocal measurement of acoustic feedback paths in hearing aids, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138 (4), EL399-EL404, 2015. <https://doi.org/10.1121/1.4933062>.
- [33] P. C. Loizou, *Speech Enhancement: Theory and Practice* (1st. edition), CRC Press, 2007. <https://doi.org/10.1201/9781420015836>.
- [34] C. R. C. Nakagawa, S. Nordholm and W. Y. Yan, New insights into optimal acoustic feedback cancellation, *IEEE Signal Processing Letter*, 20 (9), 869-872, 2013. <https://doi.org/10.1109/LSP.2013.2271318>.





Elektrikli araçlar için farklı hız profilleri altında model öngörülü akım kontrollü İSMSM sürücüsünün başarımı

Performance of model predictive current controlled IPMSM drive under different speed profiles for electric vehicles

Rıdvan Demir^{1,*} 

¹ Kayseri Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38280, Kayseri, Türkiye

Öz

Elektrikli araçlar için, yük ve araç hızının şehir içi yol, kırsal yol, otoyol veya arazi yolları gibi gerçek trafik koşullarının tamamında nasıl değiştiğini kesin olarak modellemek kolay değildir. Bununla birlikte uluslararası geçerliliği olan bazı elektrikli araç sürüş döngüleri tipik trafik koşullarını modellemek için iyileştirilmiştir. Bu çalışmada, araçlar için iyileştirilen sürüş döngülerinden bazıları model öngörülü akım kontrol tabanlı elektrikli araç sürücüsüne hız referansı olarak uygulanmıştır. Ek olarak elektrikli aracın toplam çekiş kuvveti kullanılarak oluşturulan yük momenti elektrikli aracı tahrik eden iç yüzey sürekli mıknatıslı senkron motora uygulanmıştır. Farklı hız profilleri ve yük momenti şartları için model öngörülü akım kontrol tabanlı elektrikli araç sürücüsünün başarımı MATLAB Simulink ortamında test edilmiştir. Farklı yük momentleri altında ve sıfır hızı da içeren geniş bir hız aralığında elde edilen benzetim sonuçları elektrikli araçlar için model öngörülü akım kontrol tabanlı iç yüzey sürekli mıknatıslı senkron motor sürücüsünün başarımını onaylamaktadır.

Anahtar kelimeler: Elektrikli araçlar, Model öngörülü akım kontrol, İç yüzey sürekli mıknatıslı senkron motor, AC motor sürücüsü

1 Giriş

Son yıllarda, elektrikli araçlar (EA'lar), hibrit elektrikli araçlar (HEA'lar) ve yakıt hücresiyle çalışan araçlara olan ilgi giderek artmaktadır. EA ve HEA'ların gün geçtikçe daha rekabetçi bir pazara girmesi, bu araçları üreten firmaları daha düşük maliyetli ve daha verimli araçlar geliştirmeye zorlamaktadır. EA'lar için başarımların kriterleri; güvenilirlik, sağlamlık, güç yönetimi, bataryalarının şarj hızı ve özellikle motor sürücü sistemleri olarak sıralanabilir [1]. EA'ların en önemli kısımlarından birisi olan elektrik motor sürücüleri, hem üreticilerin hem de araştırmacıların oldukça ilgisini çekmektedir.

EA'ların tahriki için asenkron motorlar (ASM'ler) ve sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM'ler) yaygın olarak kullanılmaktadır [1,2]. Bu motorların avantajları; fırçasız olmaları, çoğu ortama uygunlukları, basit yapıları ve yüksek başlangıç momentine sahip olmaları olarak

Abstract

For electric vehicles, it is not easy to model exactly how the load and vehicle speed change in all real traffic conditions such as urban roads, rural roads, highways, or off-road. However, some internationally valid electric vehicle driving cycles have been improved to model typical traffic conditions. In this study, some of the enhanced driving cycles for vehicles are applied to the model predictive current control-based electric vehicle drive as the speed reference. In addition, the load torque generated by using the total traction force of the electric vehicle is applied to the interior permanent magnet synchronous motor driving the electric vehicle. The performance of the model predictive current control-based electric vehicle drive for different speed profiles and load torque conditions is tested in MATLAB Simulink environment. The simulation results obtained under different load torques and a wide speed range including zero speed confirm the performance of the model predictive current control based interior permanent magnet synchronous motor drive for electric vehicles.

Keywords: Electrical vehicles, Model predictive current control, Interior permanent magnet synchronous motors, AC motor drive

sıralanabilir [3]. Anahtarlamalı relüktans motorlar (ARM'ler), EA'lar için kullanılan diğer motorlardandır [4]. ARM'lerde kalıcı mıknatıslar yoktur ve zorlayıcı ortamlar için uygun, güçlü ve sağlamdırlar. Ancak, özel ve uzmanlaşmış bir güç eviricisine ihtiyaç duyma, daha düşük güç faktörü ve önemli akustik gürültü gibi dezavantajlara sahiptirler. Ek olarak, belirli bir moment sağlamak için daha fazla giriş akımı gerektirirler [3].

Yüksek başarımlı değişken hız ve moment kontrolü gerektiren EA uygulamaları için kullanılan iç yüzey SMSM'ler (İSMSM'ler) yüksek verime, yüksek güç yoğunluğuna ve yüksek güç faktörüne sahiptirler. Geniş bir hız-moment aralığında yüksek verimliliklerini koruyabilirler. Ayrıca, çalışma bölgesinin çoğunda sabit güçte çalışabilir ve daha düşük akustik gürültü ve titreşim üretirler [5,6]. Bununla birlikte İSMSM'lerin doğrusal olmayan modele ve çalışma koşulları ile değişen parametrelere sahip olmaları İSMSM sürücülerin kontrolünü

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ridvandemir@kayseri.edu.tr (R. Demir)
Geliş / Received: 26.08.2024 Kabul / Accepted: 19.09.2024 Yayımlanma / Published: 15.10.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1538775

gerçekleştiren sürücü sistemleri için hala zorlayıcı olmaktadır [7].

Elektrik motorlarının yüksek başarılı kontrolünde kullanılan alan yönlendirmeli kontrol ve doğrudan moment kontrol yöntemlerine alternatif olarak önerilen model öngörülü kontrol (MÖK), hızlı dinamik başarımı, basit prensibi ve doğrusal olmayan kısıtlamaları hesaba katma yeteneğinden dolayı son yıllarda oldukça çok tercih edilmektedir [8]. MÖK kavramı, motora uygulanacak en iyi gerilim vektörünü elde etmek amacıyla stator akımı, stator/rotor akısı veya endüklenen moment gibi durumları kullanan motor modelinin gelecekteki davranışının öngörülmesine dayanmaktadır [9]. Elektrik motor sürücülerinde kullanılan MÖK tabanlı yöntemlerden birisi de model öngörülü akım kontrol (MÖAK) yöntemidir [10]. MÖAK yöntemi, öngörülen stator akımlarını kullanarak maliyet fonksiyonunu eniyileyen gerilim vektörünü belirleme temeline dayanmaktadır. Literatürde MÖAK tabanlı SMSM sürücüsü ile alakalı birçok çalışma bulunmaktadır [8,11-15]. Ref [8]'de MÖAK sisteminde motora uygulanacak en iyi gerilim vektörünün belirlenmesinde tüm gerilim vektörleri yerine yalnızca seçilen vektör için görev döngüsü hesaplanmış ve böylece hesaplama yükünü azaltmıştır. Ref [12], 'de MÖAK sisteminin parametre değişikliklerine karşı hassasiyeti incelenmiştir. Ref [15]'te ise hem hesaplama yükü azaltmış hem de parametre değişimlerine karşı MÖAK sisteminin dayanıklılığını analiz edilmiştir. Bu çalışmaların birçoğunda MÖAK sistemine kısa süreli rampa ve/veya basamak şeklinde oluşturulan hız referansları uygulanmıştır.

EA'lar için yük ve araç hızının gerçek trafik koşullarının tamamında nasıl değiştiğini kesin olarak modellemek kolay değildir. Bununla birlikte bazı araç sürüş döngüleri tipik trafik koşullarını modellemek için iyileştirilmiştir. Bunlar arasında; dünya çapında uyumlu hafif araçlar test prosedürü-3 (Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure 3-WLTP-3) [16], yeni Avrupa sürüş döngüsü (New European Driving Cycle-NEDC) [16], New York Şehir döngüsü (New York City Cycle-NYCC) [17], kentsel dinamometre sürüş programı (Urban Dynamometer Driving Schedule-UDDS) [9] ve karayolu yakıt ekonomisi testi (The Highway Fuel Economy Test-HWFET) [18] gibi sürüş döngüleri bulunmaktadır.

Bu çalışmada yukarıda ifade edilen sürüş döngülerinden bazıları (WLTP, UDDS, NEDC ve HWFET) MÖAK tabanlı EA sürücüsüne hız referansı olarak uygulanmış ve farklı hız profilleri için MÖAK tabanlı EA sürücüsünün başarımı test edilmiştir. Ayrıca EA'nın farklı sürüş döngüleriyle oluşan toplam çekiş kuvveti kullanılarak elde edilen yük momenti, İSMSM'ye uygulanmıştır. Sıfır hızı da içeren geniş bir hız aralığı için elde edilen benzetim sonuçları, EA'lar için MÖAK tabanlı İSMSM sürücüsünün başarımını onaylamaktadır.

Bu çalışma toplam altı bölümden oluşmaktadır. EA ve İSMSM'ler ile ilgili genel bir literatür Bölüm 1'de verilmiştir. Bölüm 2 ve 3'te sırasıyla EA modeli ve İSMSM modeli ile ilgili detaylar sunulmuştur. Model öngörülü akım kontrol sistemi Bölüm 4'te, farklı sürüş döngüleri altında İSMSM sürücüsünün kontrol başarımının gösterilmesi

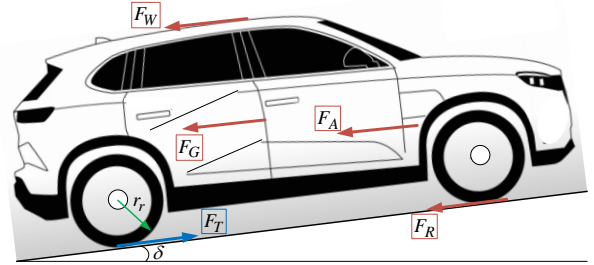
amacıyla yapılan benzetim çalışmaları Bölüm 5'te verilmektedir. Son olarak sonuçlar ve yorumlar Bölüm 6'da ifade edilmiştir.

2 Elektrikli Araç Dinamik Modeli

Hareket halindeki bir araç için araca etkiyen tipik kuvvetler; hava ve araç etkileşiminden kaynaklanan rüzgar kuvveti (F_W), lastik ve yol etkileşiminden kaynaklanan yuvarlanma kuvveti (F_R), yolun çeşitli eğimlerinden kaynaklanan yerçekimi kuvveti (F_G) ve araç kütlelerini hızlandırma ihtiyacından kaynaklanan ivme kuvveti (F_A) olarak sıralanabilir. Şekil 1'de gösterildiği gibi elektrikli araç için toplam çekiş kuvvetine (F_T 'ye) ait genel matematiksel ifade Denklem (1)'de verilmiştir [19,20].

$$F_T = F_R + F_W + F_G + F_A \quad (1a)$$

$$F_T = K_R M_v g \cos \delta + K_W A V^2 + M_v g \sin \delta + M_v a \quad (1b)$$



Şekil 1. Elektrikli araç dinamik modeli

Denklem (1)'de K_R ortalama asfalt yol için yuvarlanma direnci katsayısı, K_W binek otomobiller için rüzgar direnci katsayısı, M_v aracın kütlesi, g yerçekimi katsayısı, A aracın ön yüzey alanı, a aracın ivmesi ve δ yolun eğimidir.

Çekiş kuvveti F_T hesaplandıktan sonra, elektrik motorunun rotor açısız hızı (ω_m) ve motora uygulanan yük momenti (τ_l) aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanır [20].

$$\omega_m = \frac{r_f}{r_r} V \quad (2)$$

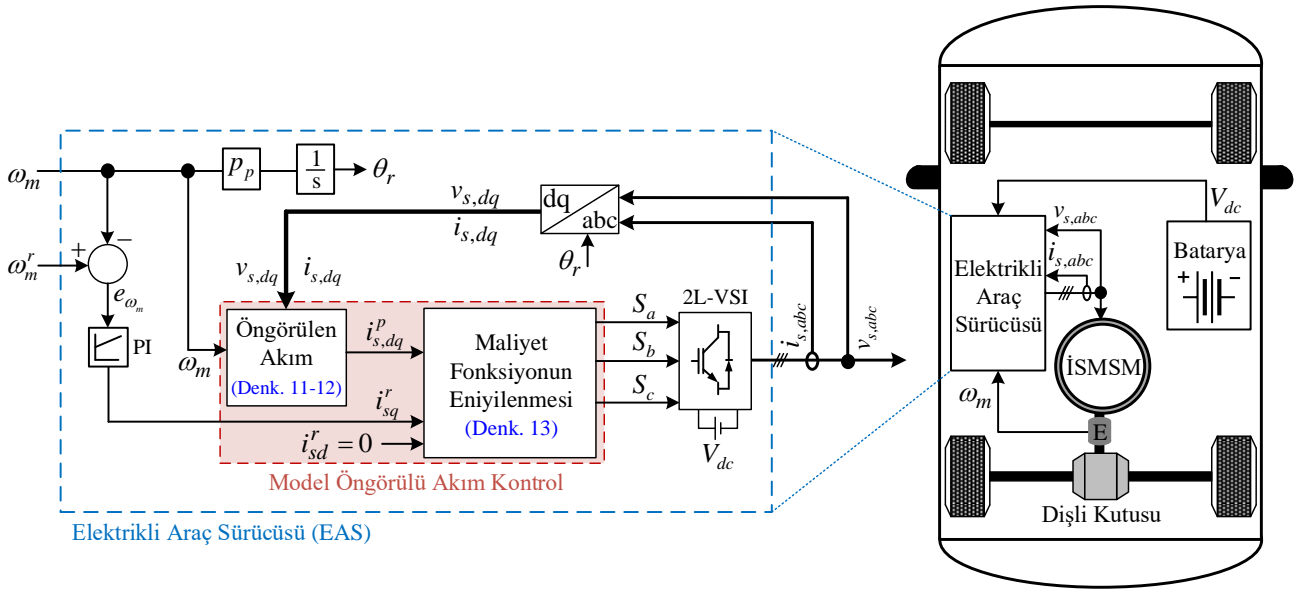
$$\tau_l = \frac{r_r}{r_f} F_T \quad (3)$$

burada r_f ve r_r sırasıyla dişli oranı ve tekerleğin yuvarlanma yarıçapıdır.

3 İSMSM'nin dinamik modeli

Dönen (dq -) eksen takımında tanımlanan İSMSM'nin matematiksel modeli Denklem (4)-(6)'da verilmiştir.

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + L_d \frac{d}{dt} i_{sd} - L_q p_p \omega_m i_{sq} \quad (4)$$



Şekil 2. Elektrikli araç sürücü sisteminin (EASS) genel yapısı ve kontrol stratejisi

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + L_q \frac{d}{dt} i_{sq} + L_d p_p \omega_m i_{sd} + p_p \omega_m \phi_{pm} \quad (5)$$

$$\tau_e = \frac{3}{2} p_p \left((L_d - L_q) i_{sd} i_{sq} + \phi_{pm} i_{sq} \right) \quad (6)$$

İSMSM'nin mekanik hareket eşitlikleri ise Denklem (7) ve (8)'de verilmiştir.

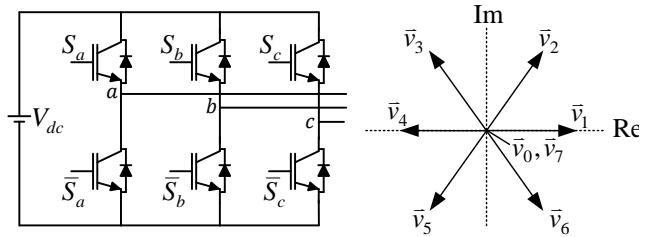
$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{J_T} (\tau_e - B_T \omega_m - \tau_l) \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_r = p_p \omega_m \quad (8)$$

Burada v_{sd} , v_{sq} ve i_{sd} , i_{sq} stator gerilim ve akımlarının d - q eksenindeki bileşenlerini; ω_m ve p_p sırasıyla rotor açısız hızını ve kutup çifti sayısını; R_s , L_d ve L_q sırası ile stator direncini ve d - q eksenindeki endüktansları; τ_e endüklenen momenti; B_T ve J_T ise sırasıyla motor ve yükün toplam vizkoz sürtünme terimi ile eylemsizliğini temsil etmektedir.

4 Model öngörülü akım kontrol tabanlı elektrikli araç sürücüsü

MÖAK kavramı, motora uygulanacak en iyi gerilim vektörünü elde etmek amacıyla doğrusal olmayan stator akımının gelecekteki davranışının öngörülmesine dayanmaktadır. Elektrikli araçlar için MÖAK tabanlı İSMSM sürücüsünün kontrol şeması Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2'de verilen İPMSM sürücü sisteminde kullanılan iki seviyeli gerilim kaynaklı eviriciye (two level-voltage source inverter (2L-VSI)) ait detaylar Şekil 3'te sunulmuştur. Benzetim çalışmalarında kullanılan kontrolörün kazançları deneme yanılma yöntemi ile belirlenmiştir.



Şekil 3. 2L-VSI ve gerilim vektörleri

Şekil 2'de gösterilen 2L-VSI'nin anahtarlama durumu Denklem (9)'da gösterildiği gibi ifade edilebilir [21].

$$\vec{S} = \frac{2}{3} (S_a + \vec{a} S_b + \vec{a}^2 S_c) \quad (9)$$

burada $\vec{a} \triangleq e^{j2\pi/3}$ ve $S_x \in \{S_a, S_b, S_c\}$ 2L-VSI'nin kollarındaki anahtarların ON/OFF durumlarını gösterir. 2L-VSI'nin çıkış gerilimi \vec{v}_s , anahtarlama durumu \vec{S} kullanılarak Denklem (10)'daki gibi hesaplanır.

$$\vec{v}_s = V_{dc} \vec{S} \quad (10)$$

Burada V_{dc} dc bağlantı gerilimidir. İki seviyeli gerilim kaynaklı evirici için, Denklem (10) sekiz anahtarlama durumu için yedi farklı gerilim vektörü verir.

MÖAK tabanlı EASS'deki "öngörülen akım" bloğunda; $v_{s,dq}$, $i_{s,dq}$ ve ω_r kullanılarak dq - eksenindeki öngörülen stator akımları Denklem (11) ve (12) kullanılarak sekiz farklı anahtarlama durumu için tahmin edilebilir.

$$i_{sd,k+1}^p = \left(1 - \frac{TR_s}{L_d} \right) i_{sd,k} + \frac{L_q}{L_d} T p_p \omega_m i_{sq,k} + \frac{T}{L_d} v_{sd,k} \quad (11)$$

$$i_{sq,k+1}^p = \left(1 - \frac{TR_s}{L_q}\right) i_{sq,k} - \frac{TL_d}{L_q} p_p \omega_m i_{sd,k} + \frac{T}{L_q} v_{sq,k} - \frac{T \varphi_{pm}}{L_q} p_p \omega_m \quad (12)$$

Öngörülen stator akımları kullanılarak hız referansının takip edilmesini sağlayan en iyi (optimum) gerilim vektörünün seçimi aşağıdaki maliyet fonksiyonu ile gerçekleştirilir [21].

$$g = \sum_{h=1}^N \left\{ (i_{sd}^r - i_{sd,k+h}^p)^2 + (i_{sq}^r - i_{sq,k+h}^p)^2 + I_m \right\} \quad (13)$$

Denklem (13)'te N tahmin ufkunu ifade etmektedir ve bir olarak seçilmiştir. i_{sd}^r ve i_{sq}^r dq – eksenindeki stator akımlarının referanslarıdır ve i_{sd}^r sıfır olarak seçilmiştir. I_m İSMSM'yi aşırı akımlara karşı koruyan sınırlama terimidir. i_{sd}^p veya i_{sq}^p 'nin genlik değerleri I_m 'den büyük veya eşit ise akım sınırlama terimi etkinleştirilir. Akım sınırlama terimi aşağıdaki gibi tanımlanır. Burada $i_{s,max}$ stator akımının maksimum genliğidir.

$$I_m = \begin{cases} \infty, & |i_{sd,k+1}^p| \geq i_{s,max} \text{ veya } |i_{sq,k+1}^p| \geq i_{s,max} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (14)$$

5 Benzetim sonuçları

Şekil 2'de gösterilen MÖAK tabanlı EA sürücüsünün başarımını test etmek ve doğrulamak için yapılan benzetim çalışmaları MATLAB Simulink [22] ortamında gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmalarında kullanılan İSMSM ve EA'ya ait parametrelerin değerleri Tablo 1 ve Tablo 2'de sunulmuştur. Benzetim çalışmalarında örneklem zamanı (T) $50\mu s$ olarak ayarlanmıştır. Ayrıca, MÖAK tabanlı sürücü sisteminden yüksek kontrol başarımı elde etmek için PI kontrolörün kazançları deneme yanılma yöntemi ile $K_p = 100$ ve $K_i = 400$ olarak seçilmiştir.

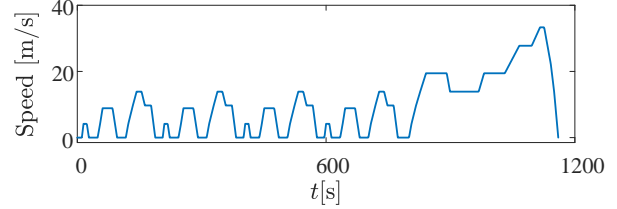
Tablo 1. Elektrikli araç parametreleri [19]

Parametre	Değeri
Araçın Kütle (Kg)	$M_v = 1400$
Araçın Ön Alanı (m^2)	$A = 2.35$
Ortalama Asfalt Yol İçin Yuvarlanma Direnci Katsayısı	$K_R = 0.015$
Binek Otomobiller İçin Rüzgar Direnci	$K_W = 0.3$
Dişli Oranı	$r_f = 2$
Tekerleğin Yuvarlanma Yarıçapı (m)	$r_r = 0.4$

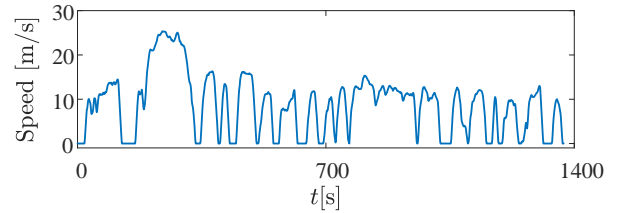
Tablo 2. İSMSM'nin parametreleri [23]

Parametre	Değeri
Kutup Çifti	$p_p = 5$
Stator Direnci (Ω)	$R = 0.18$
d – eksen endüktansı (mH)	$L_d = 0.174$
q – eksen endüktansı (mH)	$L_q = 0.29$
Kalıcı mıknatıs akısı (Wb)	$\varphi_{pm} = 0.0711$
Eylemsizlik (kgm^2)	$J_T = 0.067$
Anma hızı (dev/dk)	$n_m = 2000$
Anma Gücü (kW)	$P_N = 60$

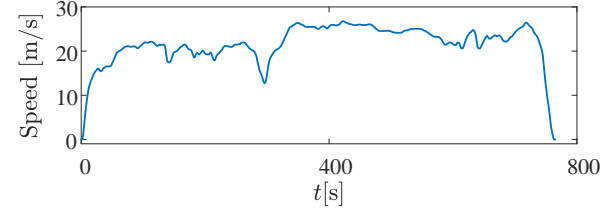
MÖAK tabanlı EA sürücüsünün etkinliği farklı sürüş döngüleri için test edilmiştir. Bu sürüş döngüleri NEDC, UDDS, HWFET ve WLTP-3 olarak sıralanabilir. Bu çalışmada kullanılan sürüş döngülerine ilişkin hız profilleri Şekil 4-7'de verilmiştir.



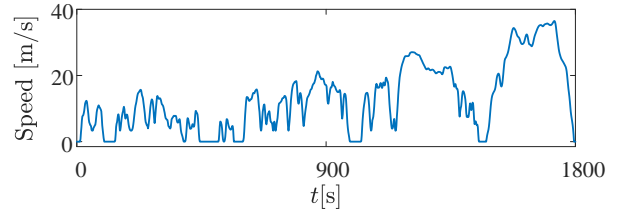
Şekil 4. NEDC sürüş döngüsü



Şekil 5. UDDS sürüş döngüsü



Şekil 6. HWFET sürüş döngüsü



Şekil 7. WLTP-3 sürüş döngüsü

Şekil 4-7 ile verilen sürüş döngüleri ile ilgili detaylar aşağıda sunulmuştur

NEDC: Sürüş döngüsünün başında dört kez tekrarlanan şehir içi sürüş döngüsü ve sonunda bir şehir dışı sürüş döngüsü içerir. Bu sürüş döngüsü, ortalama 9.17 m/s (33 km/h) hızla 1180 saniye sürmektedir.

UDDS: Sürüş döngüsü, yaklaşık 8.89 m/s (32 km/h) ortalama hız ve 25.56 m/s (92 km/h) maksimum hız ile 12 km uzunluğundaki şehir içi güzergahını kapsamaktadır. Bu sürüş döngüsü ise toplam 1370 saniye sürmektedir.

HWFET: Bu sürüş döngüsü de 20.83 m/s (78 km/h) ortalama hız ile 16.7 km uzunluğundaki bir güzergah için 765 saniye sürmektedir.

WLTP-3: Bu sürüş döngüsü her biri farklı bir maksimum hıza sahip dört farklı alt bölgeye ayrılmıştır. Birinci bölge

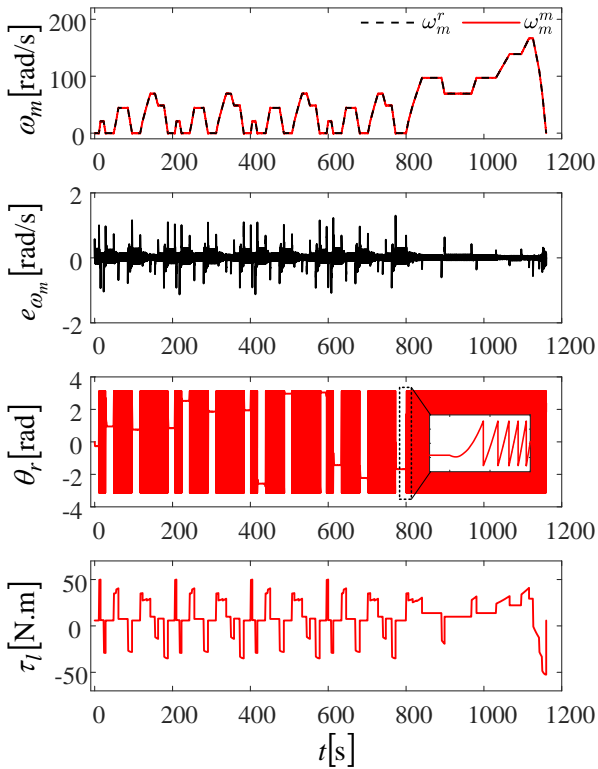
maksimum hızı 15.7 m/s'ye (56.5 km/h) kadar olan düşük hız bölgesidir. İkinci bölge maksimum hızı 21.28 m/s'ye (76,6 km/h) kadar olan orta hız bölgesidir. Üçüncü bölge maksimum hızı 27 m/s'ye (97.4km/h) kadar olan yüksek hız bölgesi ve son olarak dördüncü bölge ise maksimum hızı 36.47 m/s'ye (131.3 km/h) kadar olan çok yüksek hız bölgesidir. Bu sürüş bölgeleri toplam 1800 saniyelik şehir içi yol, mahalle arası, kırsal ve otoyol senaryolarını içermektedir.

Şekil 2'de verilen EA sürücüsüne hız referansı olarak uygulanan ω_m^r Şekil 4-7 ile verilen sürüş döngülerindeki EA hızları için Denklem (2) kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca Şekil 4-7 ile verilen hızlar ve EA parametreleri için Denklem (1b) kullanılarak EA'nın toplam çekiş kuvveti (F_T) hesaplanmıştır. Ek olarak, EA'yı tahrik eden İSMSM'ye uygulanan yük momenti Denklem (3) kullanılarak elde edilmiştir.

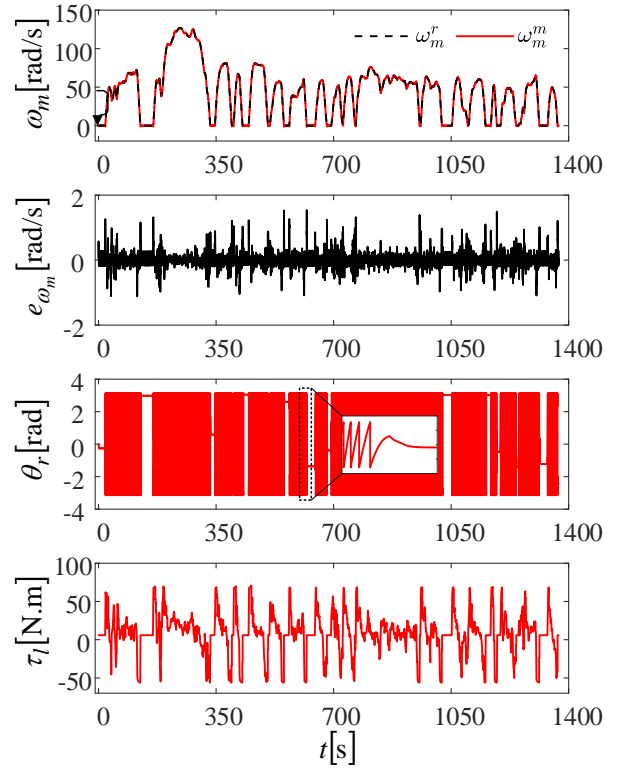
NEDC, UDSS, HWFET ve WLTP-3 sürüş döngüleri için MÖAK tabanlı EA sürücüsünden elde edilen benzetim sonuçları Şekil 8-11'de verilmiştir. Şekil 8-11 ile verilen benzetim sonuçları rotor açsal hızı (ω_m), rotor konumu (θ_r) ve hız hatası (e_{ω_m}) ile birlikte motora uygulanan yük momenti (τ_l) değişimlerini içermektedir.

Şekil 8-11'de verilen referans hız ve motor hız arasındaki ortalama karesel hata (the mean square error-MSE) aşağıdaki denklem ile hesaplanmış ve hata değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

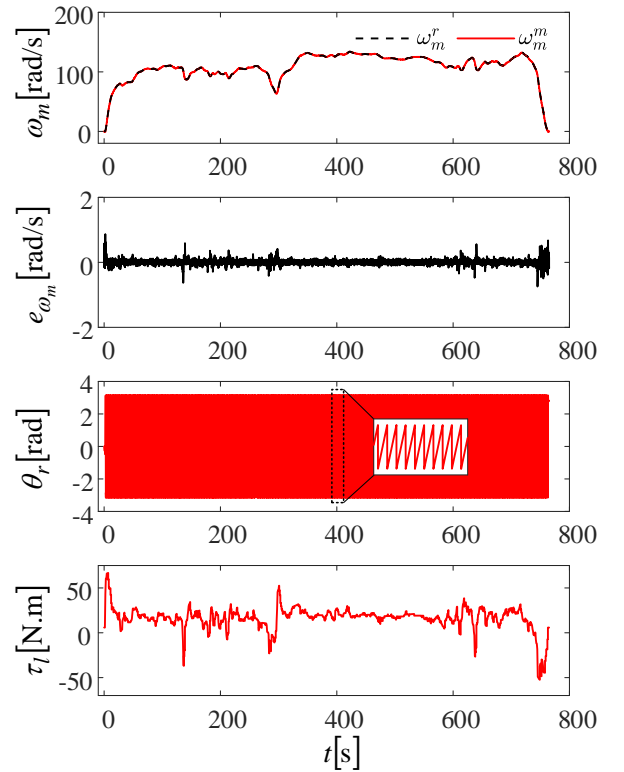
$$e_{\omega_m}^{MSE} = \frac{1}{N} \sum (\omega_m^r - \omega_m^m)^2 \quad (15)$$



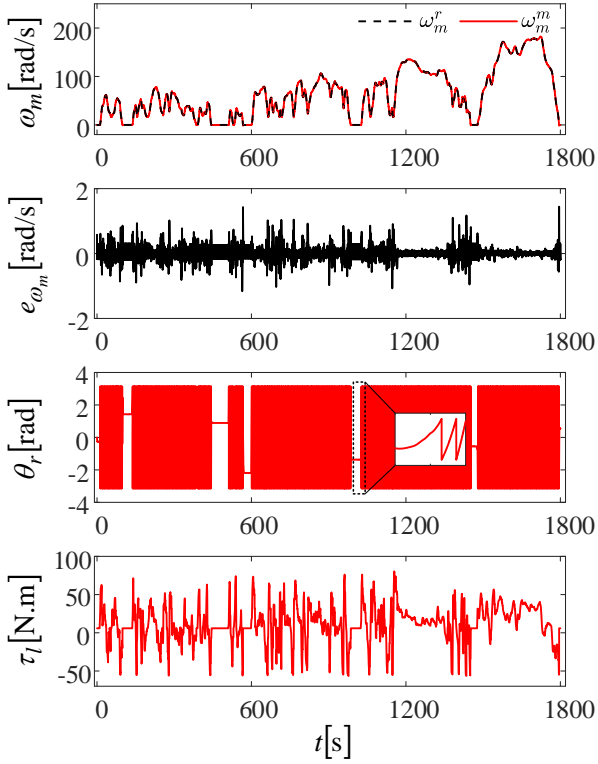
Şekil 8. NEDC sürüş döngüsü için MÖAK tabanlı EA sürücüsüne ait benzetim sonuçları



Şekil 9. UDSS sürüş döngüsü için MÖAK tabanlı EA sürücüsüne ait benzetim sonuçları



Şekil 10. HWFET sürüş döngüsü için MÖAK tabanlı EA sürücüsüne ait benzetim sonuçları



Şekil 11. WLTP-3 sürüş döngüsü için MÖAK tabanlı EA sürücüsüne ait benzetim sonuçları

Tablo 3. Şekil 8-11’de verilen hız değerleri için ortalama karesel hata ($e_{\omega_m}^{MSE} = 1/N \sum (\omega_m^r - \omega_m^m)^2$)

Şekil Numarası	Hata Değeri
Şekil 8	0.0123
Şekil 9	0.0176
Şekil 10	0.0027
Şekil 11	0.0130

Şekil 8-11 ve Tablo 3 incelendiğinde aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir.

- Şehir içi yol, kırsal yol ve otoyol şartlarını içeren uluslararası geçerliliği olan farklı sürüş döngüleri kullanılarak oluşturulan benzetim çalışmaları İSMSM’nin açısız hız referansı için MÖAK tabanlı sürücünün kontrol başarımının yüksek olduğunu göstermektedir.

- Araca etkien toplam çekiş kuvveti kullanılarak elde edilen yük momenti değişimlerine karşı sürücü sisteminin başarımı tatmin edici seviyededir.

Özetle farklı sürüş ve yol şartları altında MÖAK tabanlı EA sürücüsünden elde edilen benzetim sonuçları MÖAK tabanlı EA sürücüsünün başarımının oldukça yüksek olduğunu onaylamaktadır.

6 Sonuçlar

EA için yük ve araç hızının gerçek trafik koşullarının tamamında nasıl değiştiğini kesin olarak modellemek kolay değildir. Bununla birlikte bazı araç sürüş döngüleri tipik trafik koşullarını modellemek için geliştirilmiştir. Bu çalışmada EA’lar için iyileştirilen sürüş döngülerinden NEDC, UDDS, HWFET ve WLTP-3’ten elde edilen hız

bilgileri, MÖAK tabanlı EA sürücüsüne referans hız olarak uygulanmıştır. Ayrıca EA’nın farklı sürüş döngüleriyle ortaya çıkan toplam çekiş kuvveti kullanılarak elde edilen yük momenti, İSMSM’ye uygulanmıştır. Farklı hız profilleri ve yük momenti değişimleri altında MÖAK tabanlı EA sürücüsünün başarımı test edilmiştir. Sıfır hızı da içeren çok geniş bir hız aralığı için elde edilen benzetim sonuçları, EA’lar için MÖAK tabanlı İSMSM sürücüsünün başarımını onaylamaktadır. Gelecek çalışmalar da uluslararası geçerliliği olan farklı sürüş döngüleri için İSMSM sürücüsünün gerçek zamanlı deneylerine odaklanılacaktır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate):%11

Kaynaklar

- [1] I. F. Bouguenna, A. Tahour, R. Kennel, and M. Abdelrahem, Multiple-Vector Model Predictive Control with Fuzzy Logic for PMSM Electric Drive Systems. *Energies*, 14(6), 1-23, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14061722>.
- [2] M. Toren and H. Mollahasanoğlu, Gömülü kalıcı mıknatıslı-fırçasız doğru akım motorda (IPMBLDC) kullanılan farklı güç dereceli NdFeB mıknatısların motor performansına etkisinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38(3), 1389-1402, 2023. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.988877>.
- [3] Z. Yang, F. Shang, I. P. Brown, and M. Krishnamurthy, Comparative Study of Interior Permanent Magnet, Induction, and Switched Reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 1(3), 245-254, 2015. <https://doi.org/10.1109/TTE.2015.2470092>.
- [4] K. Diao, X. Sun, G. Lei, G. Bramerdorfer, Y. Guo, and J. Zhu, System-Level Robust Design Optimization of a Switched Reluctance Motor Drive System Considering Multiple Driving Cycles. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 36(1), 348-357, 2021. <https://doi.org/10.1109/TEC.2020.3009408>.
- [5] L. Chen, H. Xu, and X. Sun, A Novel Strategy of Control Performance Improvement for Six-Phase Permanent Magnet Synchronous Hub Motor Drives of EVs Under New European Driving Cycle. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(6), 5628-5637, 2021. <https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3079576>.
- [6] H. Chaoui, M. Khayamy, and O. Okoye, Adaptive RBF Network Based Direct Voltage Control for Interior PMSM Based Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67 (7), 5740-5749, 2018, <https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2813666>.
- [7] O. C. Kivanc and S. B. Ozturk, Sensorless PMSM Drive Based on Stator Feedforward Voltage Estimation Improved With MRAS Multiparameter Estimation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 23(3), 1326-1337, 2018, <https://doi.org/10.1109/TMECH.2018.2817246>.

- [8] S. Abareshi, S. Tohidi, M. B. Bannae Sharifian, and A. Younesi, Model predictive control by combining vectors for surface and interior permanent-magnet synchronous motor. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(8), e12959, 2021. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12959>.
- [9] A. A. Ahmed, M. M. Akl, and E. E. M. Rashad, A comparative dynamic analysis between model predictive torque control and field-oriented torque control of IM drives for electric vehicles, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31 (11), e13089, 2021. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13089>.
- [10] O. Sandre-Hernandez, J. Rangel-Magdaleno, and R. Morales-Caporal, A Comparison on Finite-Set Model Predictive Torque Control Schemes for PMSMs. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(10), 8838–8847, 2018. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2777973>
- [11] Y. Zhang, D. Xu, J. Liu, S. Gao, and W. Xu, Performance Improvement of Model-Predictive Current Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(4), 3683–3695, 2017. <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2690998>.
- [12] X. Zhang, L. Zhang, and Y. Zhang, Model Predictive Current Control for PMSM Drives With Parameter Robustness Improvement. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(2), 1645–1657, 2019. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2835835>.
- [13] S. Fan and C. Tong, Model predictive current control method for PMSM drives based on an improved prediction model. *Journal of Power Electronics*, 20(6), 1456–1466, 2020. <https://doi.org/10.1007/s43236-020-00125-4>.
- [14] S. G. Petkar, K. Eshwar, and V. K. Thippiripati, A Modified Model Predictive Current Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Drive. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(2), 1025–1034, 2021. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.2970671>.
- [15] X. Jiang *et al.*, An Improved Implicit Model Predictive Current Control With Continuous Control Set for PMSM Drives. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 8(2), 2444–2455 2022. <https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3144667>.
- [16] A. O. Kiyaklı and H. Solmaz, Modeling of an Electric Vehicle with MATLAB/Simulink. *International Journal of Automotive Science And Technology*, 2(4), 9–15, 2018. <https://doi.org/10.30939/ijastech.475477>.
- [17] V.P., Dhote, M.M. Lokhande, and S.C. Gupta., Test bench setup for emulating electric vehicle on-road conditions, *Energy Reports*, 9, 218–227, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.05.145>
- [18] C. P. Sahwal, S. Sengupta, and T. Q. Dinh, Advanced Equivalent Consumption Minimization Strategy for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles. *Journal of Cleaner Production*, 437, 1-14, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140366>.
- [19] M. Alzayed and H. Chaoui, Efficient Simplified Current Sensorless Dynamic Direct Voltage MTPA of Interior PMSM for Electric Vehicles Operation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 71(12) 12701–12710, 2022. <https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3198095>.
- [20] C. T. Krasopoulos, M. E. Beniakar, and A. G. Kladas, Velocity and Torque Limit Profile Optimization of Electric Vehicle Including Limited Overload. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(4), 3907–3916, 2017. <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2680405>
- [21] R. Demir, Speed-sensorless Predictive Current Controlled PMSM Drive With Adaptive Filtering-based MRAS Speed Estimators, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 21(8), 2577–2586, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12555-022-0698-z>.
- [22] MathWorks Inc., *MATLAB 2023a/Simulink. Simulation and Model Based Design*. MA, USA: Natick. (2023).
- [23] X. Sun, Y. Zhang, X. Tian, J. Cao, and J. Zhu, ‘Speed Sensorless Control for IPMSMs Using a Modified MRAS With Gray Wolf Optimization Algorithm’, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 8(1),1326–1337, 2022. <https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3093580>.





Kompleks bir Pb-Zn cevherinin sülfürik asit çözeltisinde liçi Leaching of a complex Pb-Zn ore in sulfuric acid solution

Safak Ozsarac¹, Sait Kursunoglu^{2,*}, Soner Top³, Mahmut Altiner⁴, Shokrullah Hussaini⁵,
Hasan Serkan Gokcen⁶, Muammer Kaya⁷

¹ Batman University, Department of Geological Engineering, 72100, Batman, Türkiye

² Batman University, Department of Petroleum and Natural Gas Engineering, 72100, Batman, Türkiye

³ Abdullah Gül University, Department of Nanotechnology Engineering, 38100, Kayseri, Türkiye

⁴ Çukurova University, Department of Mining Engineering, 01330, Adana, Türkiye

⁵ Department of Mining and Metallurgical Engineering, University of Nevada, 1664 N. Virginia St, Reno, 89557, NV, USA

^{6,7} Eskişehir Osmangazi University, Department of Mining Engineering, 26040, Eskişehir, Türkiye

Abstract

In this study, the leaching behavior of a Gazipaşa-Aydap complex Zn-Pb ore sample in sulfuric acid solutions was investigated. Firstly, the chemical and mineralogical compositions of the ore sample were determined by AAS, ICP-OES, XRF, and XRD analyses. The ore seemed to be very complex, containing major amounts of zinc (16.4%), lead (10.6%), iron (2.6%), and a minor amount of copper (0.2%). The leaching experiments demonstrated that 86.7% Zn, 90% Cu, and 25.2% Fe could be taken into the leach solution under the following conditions: 2 M sulfuric acid concentration, 25 °C leaching temperature, 1/10 solid-to-liquid ratio, and 125 rpm shaking rate. The effects of the leaching temperature on the metal dissolutions were also tested. The experimental results revealed that increasing the leaching temperature had no beneficial effect on zinc dissolution, but increased iron dissolution significantly. Overall, it was determined that zinc could be extracted from the complex ore using a short leaching time (30 min), a low leaching temperature (25 °C), a relatively low sulfuric acid concentration (2 M), and a relatively high solid-to-liquid ratio (2/10).

Keywords: Complex Zn-Pb ore, Gazipaşa-Aydap, sulfuric acid, zinc leaching

1 Introduction

Zinc holds immense significance as a nonferrous metal extensively utilized in alloy manufacturing and galvanization industries [1]. With a global shift towards reducing sulfur emissions during processing, zinc oxide ores are increasingly favored for zinc extraction, especially amidst sphalerite depletion [2]. Non-sulphide sources might contribute over 10% to global zinc metal production [3], yet untapped reserves remain underutilized due to limited processing methods, notably for low-grade zinc oxide ores with high silicon content [4-5]. In metallurgical sectors, substantial quantities of lead-zinc sulphide ore are floated, resulting in significant non-ferrous and precious metal losses. The rising demand for zinc necessitates thoroughly

Öz

Bu çalışmada Gazipaşa-Aydap kompleks Zn-Pb cevher numunesinin sülfürik asit çözeltisindeki liç davranışı incelenmiştir. Öncelikle cevher örneğinin kimyasal ve mineralojik bileşimleri AAS, ICP-OES, XRF ve XRD analizleri ile belirlenmiştir. Cevherin yapısının çok karmaşık olduğu ve yüksek miktarda çinko (%16.4), kurşun (%10.6), demir (%2.6) ve az miktarda bakır (%0.2) içerdiği görülmüştür. 2 M sülfürik asit konsantrasyonu, 25 °C liç sıcaklığı, 1/10 katı/sıvı oranı ve 125 rpm çalkalama hızı parametrelerinde gerçekleştirilen liç işlemi ile %86.7 Zn, %90 Cu ve %25.2 Fe'nin liç çözeltisine alınabileceği saptanmıştır. Deneysel sonuçlar, liç sıcaklığının artırılmasının çinko çözünmesi üzerinde yararlı bir etkisinin olmadığını ancak demir çözünmesini önemli ölçüde arttırdığını ortaya koymuştur. Genel olarak çinkonun, kısa bir liç süresi (30 dakika), düşük bir liç sıcaklığı (25 °C), nispeten düşük bir sülfürik asit konsantrasyonu (2 M) ve nispeten yüksek bir katı-sıvı oranı (2/10) kullanılarak kompleks cevherden ekstrakte edilebileceği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Kompleks Zn-Pb cevheri, Gazipaşa-Aydap, sülfürik asit, çinko liçi

exploration of methods to recover zinc from low-grade ores. Projections for 2018 anticipated zinc production and consumption at 13.42 Mt and 13.74 Mt respectively, with a world reserve exceeding 230 Mt [6-7]. Extraction processes like pyrometallurgy and hydrometallurgy offer routes for zinc extraction from oxide ores [8]. While pyrometallurgy suits high-grade ores better, hydrometallurgy emerges as the preferred choice for low-grade ores due to economic, environmental, and technological advantages. Moreover, metals can be directly obtained from pure leaching solutions or recovered from impure ones.

In nature, zinc and lead minerals often coexist within deposits, presenting three primary types of mineralization: sulfide ores, mixed sulfide-oxide ores, and non-sulfide ores, which can undergo weathering in hypogene or supergene

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: sait.kursunoglu@batman.edu.tr (S. Kursunoglu)
Geliş / Received: 24.03.2024 Kabul / Accepted: 22.09.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1458024

conditions. Zinc oxide ores, including willemite (Zn_2SiO_4), smithsonite ($ZnCO_3$), hemimorphite ($Zn_4(Si_2O_7)(OH)_2 \cdot H_2O$), hydrozincite ($Zn_5(CO_3)_2(OH)_6$), and zincite (ZnO), stand out as significant sources of zinc [9]. Treating such intricate and low-grade metal sources, often containing finely dispersed lead and zinc, favors hydrometallurgical processes over pyrometallurgical ones due to their environmental friendliness, lack of harmful emissions or dust, and cost-effectiveness for small-scale operations [10-11]. Common gangue minerals found in zinc oxide ores include hematite (Fe_2O_3), goethite ($FeOOH$), dolomite ($CaMg(CO_3)_2$), calcite ($CaCO_3$), and quartz (SiO_2), which bring about the significant acid consumption during processing [12]. Extraction of zinc from zinc or lead-zinc oxide ores often involves using acidic reagents, such as sulfuric acid and hydrochloric acid solutions, which have been shown effective in various studies. Sulfuric acid solutions readily dissolve zinc in its oxide, silicate, and carbonate forms, while lead typically does not form insoluble lead sulfate during acid leaching [13-17].

Numerous investigations have aimed to enhance the recovery and quality of zinc ores through flotation or gravity methods, yet these techniques have shown limited effectiveness in altering the inherent properties of the ores [18-19]. The focus of research has shifted towards hydrometallurgical processing of zinc oxide ores using alkaline (such as sodium hydroxide and ammonium) or sulfuric acid solutions. Several studies have explored the alkaline leaching of zinc oxide ores, with findings suggesting the superiority of alkaline media over acidic ones [20]. Optimal conditions for leaching zinc from oxide ores were achieved at 5% NaOH concentration, temperatures of 90-95 °C, and a duration of 90 minutes. In column leaching experiments conducted with low-grade zinc oxide ore containing 5.2% zinc, the utilization of ammonium sulfate resulted in the dissolution of 92.2% of the zinc [21]. Further research revealed that under specific conditions, such as leaching for 120 minutes at 358 K with a sodium hydroxide concentration of 5 mol/L and a liquid-to-solid ratio of 10/1, zinc leaching recovery exceeded 73% for zinc oxide ores sized between 65-76 μm [22]. Notably, alkaline leaching offers advantages such as lower iron dissolution and the absence of silica gel formation. However, it is important to note that the mineral hemimorphite remains insoluble using this method.

In most industrial settings, sulfuric acid leaching stands out as the most adaptable method. However, a notable challenge arises during the leaching of zinc silicate ores, where the formation of silica gel can lead to substantial issues in liquid-solid separation. This gel-like precipitate has the potential to obstruct ore particles, resulting in poor leaching kinetics and recoveries, even in heap or dump leaching processes [5]. Additionally, sulfuric acid processing presents drawbacks such as high acid consumption and intricate purification procedures, which can hinder the efficiency of subsequent stages like solvent extraction, ion exchange, and electrolysis [23]. Various approaches, including coagulation and flocculation, have been employed to mitigate this issue. One continuous concurrent method

involves initially dissolving soluble silica and subsequently coagulating the formed colloidal silica by adjusting the solution's pH using a neutralizing agent [24]. The primary aim of this study is to explore the feasibility of selectively extracting zinc from a complex Zn-Pb ore through sulfuric acid leaching while simultaneously rejecting a significant portion of impurities (such as Fe, Cu, and Pb) in the leach residue. Several factors affecting zinc leaching were investigated, including leaching time, acid concentration, leaching temperature, and solid-to-liquid ratio.

2 Material and methods

The ore sample was sourced from Dh Mining Co., located in Gazipasa-Aydap, Antalya, Türkiye. Initially, the ore underwent grinding in a laboratory ball mill. The chemical composition analysis was conducted through digestion and solution analysis utilizing inductively coupled plasma optical emission spectroscopy (ICP-OES, Perkin Elmer) at Batman University, and atomic absorption spectroscopy (AAS, Perkin Elmer) at Abdullah Gül University. Additionally, the ore sample's chemical composition was analyzed using X-ray fluorescence spectrometry (XRF, Minipal 4 Panalytical) at Çukurova University. For mineralogical identification, an X-ray diffraction instrument (XRD, Bruker Discover) at Abdullah Gül University was employed, calibrated with a silicon standard for alignment within the $2\theta=5-90^\circ$ range, utilizing Cu $K\alpha$ radiation generated at 40 mA and 40 kV. The particle size distribution of the ore sample was determined using a laser diffraction particle size analyzer (Malvern Mastersizer 2000) at Eskişehir Osmangazi University.

The leaching experiments were conducted in 100-mL Erlenmeyer glass flasks fitted with oakum covers to minimize evaporative losses. These flasks were submerged in a temperature-controlled water bath equipped with an orbital shaker (MIPROLAB), as depicted in Figure 1 illustrating the experimental setup. The water bath temperature was regularly monitored using a glass thermometer. Each experiment involved adding 50 mL of a solution with a 2 M sulfuric acid concentration to the flask, followed by the addition of 5 g of the ground ore sample. Upon completion of the experimental sets, the flasks were filtered using Whatman 1 filter paper, and the residues were washed with deionized water. The resulting solutions (leachate) were analyzed using ICP-OES and AAS. Analytical-grade sulfuric acid (97% purity, H_2SO_4 , Merck) was utilized. Throughout the tests, the solid-to-liquid ratio (w/v) and shaking rate remained constant at 1/10 and 125 rpm, respectively, unless otherwise specified. Dissolution percentages were calculated using Equation (1), and experiments were duplicated or triplicated to ensure accuracy, with dissolution percentages constructed at a 95% confidence level.

$$Dissolution (\%) = \frac{\mu \times v}{\eta \times \omega} \times 100 \quad (1)$$

μ is the metal concentration in the leachate (mg/L), v is the volume of the analysed leachate (L), η is the metal

concentration in ore sample (mg/kg), ω is the mass of the ore sample (kg).



Figure 1. Experimental set-up.

3 Results and discussion

3.1 Ore sample characterization

The chemical composition of the ore sample utilized in this study is detailed in Table 1. Predominantly, the ore sample comprises Zn, Pb, and Fe as major elements, alongside minor quantities of Cu. Figure 2 illustrates the XRD pattern of the ore sample, indicating the presence of major mineral phases such as smithsonite ($ZnCO_3$), cerussite ($PbCO_3$), dolomite ($CaMg(CO_3)_2$), quartz (SiO_2), and galena (PbS). XRD analysis confirms that the ore sample can be categorized as a complex ore containing carbonate and sulfur constituents. As depicted in Figure 3, the particle size distribution analysis reveals that approximately 80% of the ore particles are smaller than 92 μm in size.

Table 1. Chemical composition of the ore sample.

AAS/ICP-OES analyses		XRF analyses	
Element	Concentration, (%)	Compound	Concentration, (%)
Zn	16.4	SiO_2	19.1
Pb	10.6	CaO	15.9
Fe	2.6	MnO	0.3
Cu	0.2	K_2O	0.16
		TiO_2	0.11
		Loss on ignition	20.7

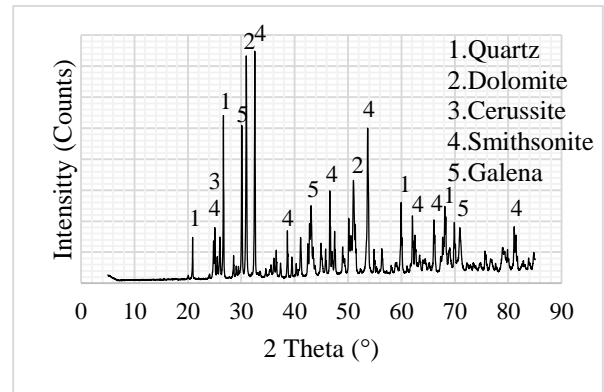


Figure 2. XRD pattern of the ore sample.

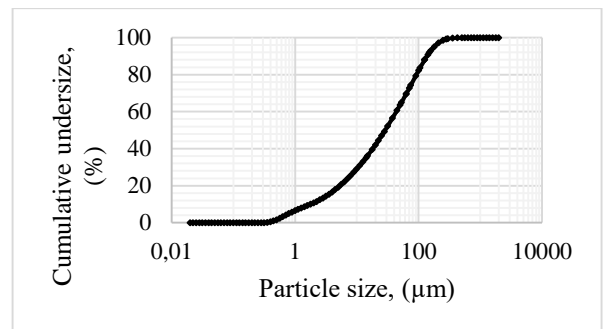
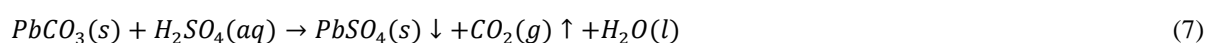
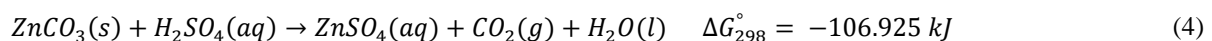


Figure 3. Particle size distribution of the ore sample.

3.2 Effect of leaching time on metal dissolution

Figure 4 illustrates the impact of leaching duration on the dissolution of zinc, lead, copper, and iron from the ore sample using a 2 M sulfuric acid solution at 25 °C. Notably, zinc dissolution remained relatively constant with increasing leaching time. Similarly, copper and iron dissolutions exhibited comparable trends across the tested durations. The findings suggest that extending leaching duration did not notably enhance the dissolution of metal values. Zinc, copper, and iron were extracted into the leach solution at rates of 86.7%, 90%, and 25.2%, respectively.

The leaching conditions were as follows: a 2 M sulfuric acid concentration, a leaching temperature of 25 °C, a solid-to-liquid ratio of 1:10, a shaking rate of 125 rpm, and a leaching time of 30 minutes. This indicates that the optimal leaching time was determined to be 30 minutes. Potential chemical reactions for leaching are provided in Eqs 2-8.



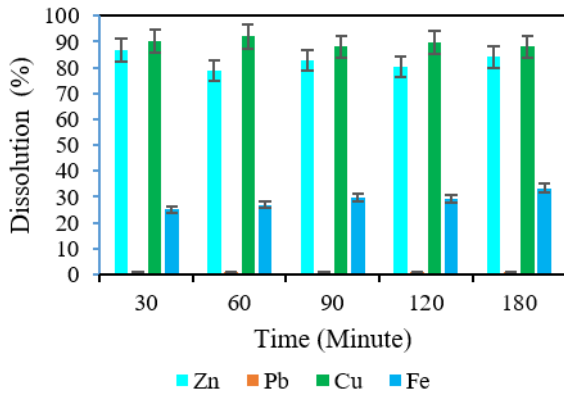


Figure 4. Dissolution of metal values versus of time [Conditions: 2 M sulfuric acid, 25 °C temperature, 1/10 solid-to-liquid ratio (w/v), 125 rpm shaking rate].

As demonstrated in Figure 4, no lead dissolution occurred when lead carbonate was exposed to sulfuric acid, leading to its precipitation as lead sulfate (as shown in Figure 5). The standard Gibbs free energies (ΔG°) of these reactions at 25 °C (298 K) were computed using HSC 6 Chemistry software, revealing that the reactions occur spontaneously according to Eqs 2-6.



Figure 5. Collected $PbSO_4$ rich precipitate [The precipitate collected at conditions: 2 M sulfuric acid, 30 minutes leaching time, 25 °C temperature, 2/10 solid-to-liquid ratio (w/v), 125 rpm shaking rate].

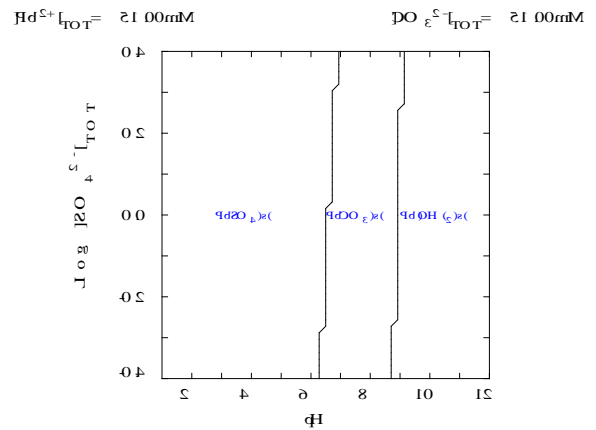
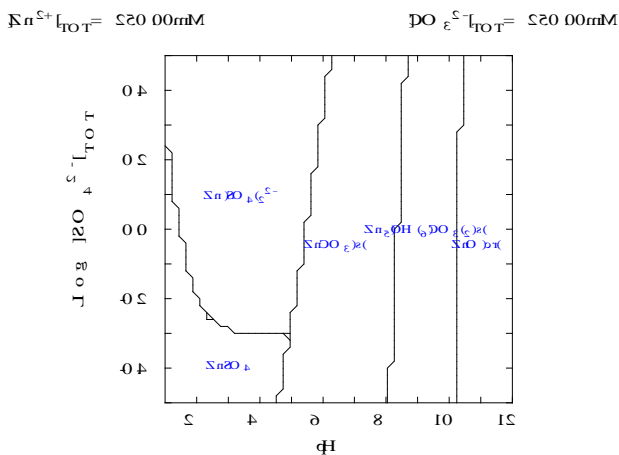


Figure 6. Predominance diagram of the $Zn-CO_3^{2-}-Pb-CO_3^{2-}-SO_4^{2-}$ system (HYDRA/MEDUSA software).

Based on the ore sample's zinc and lead content added to the solution, the concentrations of Zn^{2+} and Pb^{2+} were determined to be approximately 16.4 g/L (~250 mM) and 10.6 g/L (~51 mM), respectively. Given the high affinity of Zn^{2+} and SO_4^{2-} for forming zinc sulfate, the leaching of zinc carbonate intensifies with increasing sulfuric acid concentration (Eq. 4). Based on experimental findings, a sulfuric acid concentration of 2 M was chosen, resulting in an SO_4^{2-} concentration of approximately 0.301 on a logarithmic scale (as depicted in Figure 6). According to the predominance diagrams illustrated in Figure 6, $Zn(SO_4)_2^{2-}$ remains stable within the pH range of approximately 0-6 when the sulfuric acid concentration is 2 M. At pH levels above 6, $ZnCO_3$ is the stable insoluble form of zinc. Conversely, the stability pH range for $PbSO_4$ is greater than 0-7, while the pH range for $PbCO_3$ stability spans approximately 7-9.

3.3 Effect of sulfuric acid concentration on metal dissolution

Figure 7 depicts the influence of sulfuric acid concentration on the dissolution of zinc, lead, copper, and iron from the Zn-Pb complex ore sample at 25 °C, with a solid-to-liquid ratio of 1/10, and a shaking rate of 125 rpm for a leaching time of 30 minutes. Interestingly, as sulfuric acid concentrations increased, zinc dissolution remained relatively stable. Approximately 85.2% of zinc was extracted into the leach solution using a 3 M sulfuric acid concentration within the 30-minute leaching duration. Under the specified conditions, over 90% of copper was leached into the solution. Fluctuations in copper dissolution were attributed to acid-consuming mineral phases like calcium and iron, low copper concentration in the ore sample, and interference of other metal ions during instrumental analysis of iron or copper concentration. Iron dissolution notably increased as sulfuric acid concentration rose from 3 M to 4 M. With a 4 M sulfuric acid concentration at 25 °C for 30 minutes of leaching time, the dissolution percentage of iron reached 37.4%. Ultimately, the optimal sulfuric acid concentration was determined to be 2 M.

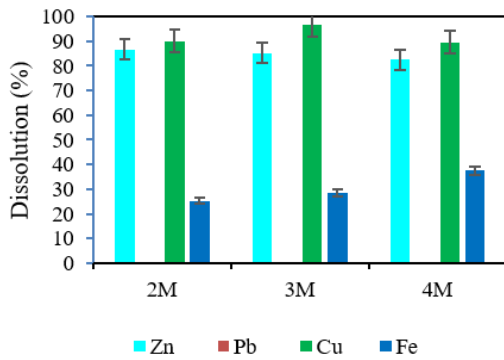


Figure 7. Dissolution of metal values as a function of sulfuric acid concentration [Conditions: 25 °C leaching temperature, 30 minutes leaching time, 1/10 (w/v) solid-to-liquid ratio, 125 rpm shaking rate].

3.4 Effect of solid-to-liquid ratio on metal dissolution

Figure 8 illustrates the impact of the solid-to-liquid ratio on the dissolution of zinc, lead, copper, and iron from the ore using a 2 M sulfuric acid solution at 80 °C for 180 minutes. Notably, the metal dissolution percentages in the leach solution exhibited a decreasing trend as the solid ratio increased. Among the experiments conducted, the highest zinc dissolution achieved was 83% at a solid-to-liquid ratio of 2/10. Additionally, 82% of copper and 63.9% of iron were co-extracted under these conditions. As the solid-to-liquid ratio increased to 2.5/10, zinc, copper, and iron dissolutions decreased to 75.6%, 53.1%, and 54.6%, respectively. The reduction in metal dissolution at higher solid-to-liquid ratios can be attributed to the limited availability of acid per unit of solid, potentially hindering dissolution reactions. Moreover, higher solid ratios may lead to stirring difficulties due to increased pulp viscosity. Conversely, higher liquid ratios result in a diluted solution, increased consumption of leaching reagents, and lower pulp viscosity, promoting better mixing of the slurry and facilitating mass transfer at the solid-liquid interface and diffusion to the leaching action. Based on these observations, a solid-to-liquid ratio of 2/10 was determined to be the optimal condition for the leaching experiments.

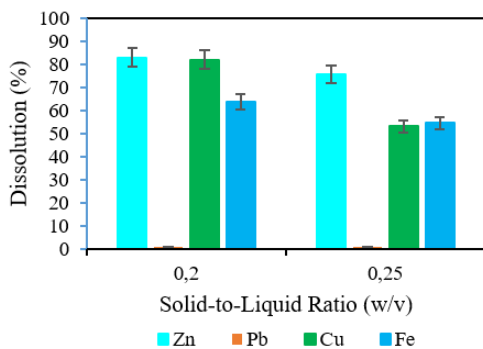


Figure 8. Dissolution of metal values as a function of solid-to-liquid ratio [Conditions: 2 M sulfuric acid, 180 minutes leaching time, 80 °C temperature, 125 rpm shaking rate].

3.5 Effect of leaching temperature on metal dissolution

Figure 9 presents the impact of temperature on the dissolution of zinc, lead, copper, and iron from the ore. Notably, at 40 °C and a solid-to-liquid ratio of 10% for 30 minutes, the zinc dissolution rate reached 85%, while copper and iron dissolutions were 86% and 30%, respectively. Upon increasing the leaching temperature from 40 to 60 °C, there were slight increases in zinc and copper dissolution percentages, reaching 88% and 91%, respectively. However, the solubility of iron exhibited a significant increase, with the dissolution rate reaching 54% at higher temperatures. These findings suggest that while the leaching temperature had little effect on zinc dissolution, it strongly influenced iron dissolution. Higher temperatures led to increased reaction rates. Since no acid is added to maintain a constant pH in the batch leaching system, the leaching reactions consumed acid, leading to an increase in pH that reduced zinc and copper dissolution rates. However, at higher temperatures, zinc and copper recoveries slightly improved, possibly due to polymerization and hydrolysis effects. These results emphasize the importance of performing the leaching process at lower temperatures. Additionally, impurities such as iron and copper should be minimized in the leach solution to prevent significant challenges during subsequent purification stages, including partial neutralization, precipitation, solvent extraction, and electrowinning.

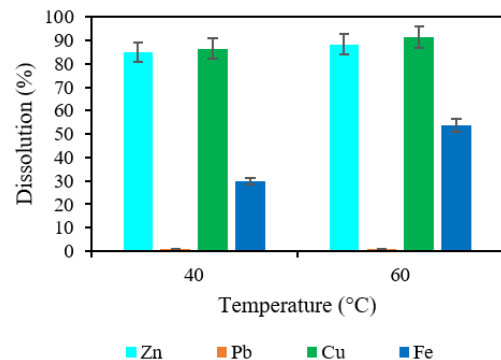


Figure 9. Dissolution of metal values as a function of leaching temperature [Conditions: 2 M sulfuric acid, 30 minutes leaching time, 1/10 (w/v) solid-to-liquid ratio, 125 rpm shaking rate].

4 Conclusions

The investigation focused on the dissolution behavior of zinc, lead, copper, and iron from a complex Zn-Pb ore in sulfuric acid solution under atmospheric pressure acidic leaching conditions. The study examined the effects of leaching time, acid concentration, solid-to-liquid ratio, and leaching temperature on metal dissolution. Based on the experimental findings, the following conclusions were drawn:

1. The ore sample comprises carbonate and sulfide-type mineral phases, suggesting potential concentration via flotation before the hydrometallurgical process.
2. XRD analysis identified carbonate and oxide mineral phases as predominant in the ore sample. Direct dissolution

of zinc from the zinc carbonate mineral phase in sulfuric acid solution appears feasible.

3. The optimal conditions for zinc dissolution from the ore sample include a short leaching time (30 minutes), a low leaching temperature (25 °C), a relatively low sulfuric acid concentration (2 M), and a high solid-to-liquid ratio (2:10).

4. Selective dissolution of zinc using sulfuric acid proved challenging. More than 90% of copper and 20% of iron were co-extracted along with zinc from the leach solution, posing significant challenges for downstream processing stages such as precipitation and separation/purification.

These conclusions underscore the complexities and considerations involved in optimizing the hydrometallurgical extraction of metals from complex ore samples, highlighting the need for careful process design and management to mitigate challenges in downstream processing.

Acknowledgment

The authors thank Geological Engineer Abdulselam Tekin from Dh Mining Co for providing the ore sample.

Conflicts of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

Similarity Rate (iThenticate): 18%

References

- [1] X. Zhu, C. Xu, J. Tang, Y. Hua, Q. Zhang, H. Liu, X. Wang, M. Huang, Selective recovery of zinc from zinc oxide dust using choline chloride based deep eutectic solvents. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 29, 2222-2228, 2019. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(19\)65128-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)65128-9)
- [2] C. Caiqiao, W.U. Xiangrui, Recovery of zinc from oxidized ore by direct leaching with sulfuric acid. *Proceedings of the First International Conference on Hydrometallurgy*, pp. 155-159 (Beijing, China, October 12-15), 1988.
- [3] M. Boni, The geology and mineralogy of non-sulphide zinc ore deposits. In: Umetsu, Y. (Ed.), *Lead & Zinc '05*. TMS, Warrendale, PA, pp. 1299-1313, 2005.
- [4] M. Ai-yuan, P. Jin-hui, Z. Li-bo, S. Li, Y. Kun, Z. Xue-mei, Leaching Zn from the low-grade zinc oxide ore in NH₃-H₃C₆H₅O₇-H₂O media. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 33, 903-917, 2016. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20160334s20150376>
- [5] Y. Zhang, Y. Hua, X. Gao, C. Xu, J. Li, Y. Li, Q. Zhang, L. Xiong, Z. Su, M. Wang, J. Ru, Recovery of zinc from a low-grade zinc oxide ore with high silicon by sulfuric acid curing and water leaching. *Hydrometallurgy* 166 16-21, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.08.010>
- [6] USGS, Lead statistics and information. U.S. Geological Survey. Available at: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lead/index.html#cs> (Accessed November 18, 2018), 2018.
- [7] I. Ehsani, A. Ehsani, A. Obut, Preparation of different zinc compounds from a smithsonite ore through ammonia leaching and subsequent heat treatment. *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, 57(4), 96-106, 2021. <https://doi.org/10.37190/ppmp/138698>
- [8] W.K. Choi, A.E. Torma, R.W. Ohline, E. Ghali, Electrochemical aspects of zinc sulphide leaching by thiobacillus ferrooxidans. *Hydrometallurgy* 33 (1), 137-152, 1993. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(93\)90010-B](https://doi.org/10.1016/0304-386X(93)90010-B)
- [9] I. Ehsani, A. Ucyildiz, A. Obut, Leaching behaviour of zinc from a smithsonite ore in sodium hydroxide solutions. *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, 55(2), 407-416, 2019. <https://doi.org/10.5277/ppmp18150>
- [10] M.K. Jha, V. Kumar, R.J. Singh, Review of the hydrometallurgical recovery of zinc from industrial wastes. *Resour. Conserv. Recycl.* 33 (1), 1-22, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(00\)00095-1](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(00)00095-1)
- [11] H.A. Sethurajan, H.A.F. Horn, P.N.L. Luiz, E.D. Lens, H. Van, *Leaching and Recovery of Metals from Metallic Industrial Sludges, Dusts and Residues-A Review*, Submitted to Sustainable Technologies for Heavy Metal Removal from Soils, Solid Wastes and Wastewater. Springer, 2016.
- [12] A. Kaya, F.S. Çakır, Recovery of Zinc from Zinc Oxide Ore by Sulfuric Acid Leaching. *Cumhuriyet Sci. J.*, Vol.40-1 179-185, 2019. <https://doi.org/10.17776/csj.463775>
- [13] S. Nagib, K. Inoue, Recovery of lead and zinc from fly ash generated from municipal incineration plants by means of acid and/or alkaline leaching. *Hydrometallurgy* 56 (3), 269-292, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00073-6](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00073-6)
- [14] A.D. Souza, P.S. Peina, E.V.O. Lima, C.A. Dasilva, V.A. Leao, Kinetics of sulphuric acid leaching of a zinc silicate calcine. *Hydrometallurgy* 89, 337-345, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2007.08.005>
- [15] S. Moradi, A.J. Monhemius, Mixed sulphide-oxide lead and zinc ores: problems and solutions. *Miner. Eng.* 24, 1062-1076, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.05.014>
- [16] S. Kursunoglu, S. Top, M. Kaya, Recovery of zinc and lead from Yahyali non-sulphide flotation tailing by sequential acidic and sodium hydroxide leaching in the presence of potassium sodium tartrate. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* (30) 3367-337, 2020. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(20\)65468-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(20)65468-1)
- [17] S. Kursunoglu, N. Kursunoglu, S. Hussaini, M. Kaya, Selection of an appropriate acid type for the recovery of zinc from a flotation tailing by the analytic hierarchy process. *J. Clean. Prod.* 283, 124659, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124659>
- [18] S.M. Bulatovic, *Handbook of Flotation Reagents: Flotation of Gold, PGM and Oxide Minerals*. Amsterdam: Elsevier Science, 2010.
- [19] T. Uysal, O. Güven, B. Tunç, İ.E. Karağaçoğlu, O. Özdemir, M.S. Çelik, Contribution of morphology on aggregation and flotation of sphalerite particles. *Minerals Engineering* 165, 106860, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106860>

- [20] J. Frenay, Leaching of oxidized zinc ores in various media. *Hydrometallurgy* 15, 243-253, 1985. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(85\)90057-X](https://doi.org/10.1016/0304-386X(85)90057-X)
- [21] L. Feng, X. Yang, Q. Shen, M. Xu, & B. Jin, Pelletizing and alkaline leaching of powdery low grade zinc oxide ores. *Hydrometallurgy* 89, 305-310, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2007.08.002>
- [22] A. Chen, W. Z. Zhao, X. Ji, S. Long, G. Huo, X. Chen, Alkaline leaching Zn and its concomitant metals from refractory hemimorphite zinc oxide ore. *Hydrometallurgy* 97, 228-232, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2009.01.005>
- [23] B. Terry, A.J. Monhemius, Acid dissolution of willemite ((Zn,Mn)₂SiO₄) and hemimorphite (Zn₄Si₂O₇(OH)₂·H₂O), *Metallurgical Transactions B*, 14: 335-346, 1983. <https://doi.org/10.1007/BF0265435>
- [24] I. G. Matthew, D. Elsner, The hydrometallurgical treatment of zinc silicate ores. *Metall. Trans. B* 8, 73-83, 1977. <https://doi.org/10.1007/BF02656354>





Investigation of cake production with the addition of lupin (*Lupinus albus*) flour Termiye (*Lupinus albus*) unu ilavesi ile kek üretiminin araştırılması

Sinem Gökal¹ , Mehmet Yetişen^{2,*} , Cem Baltacıoğlu³ 

^{1,2,3} Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

Abstract

This study investigated the effects of lupin flour addition on the physicochemical, textural, and sensory properties of cakes. It was found that the protein content of cakes increased from 6.13% to 17.50% with the addition of lupin flour in specific proportions, while the color values of the cake crust were also enhanced. The results indicated no significant difference in both moisture and total oil content of the cake samples with lupin flour addition; however, a decrease in the volume and carbohydrate content of the cakes was observed. Increasing the amount of lupin flour led to a reduction in the textural properties of the cake samples, such as springiness, cohesiveness, gumminess, chewiness, and resilience, while the change in hardness was found to be insignificant. Statistically significant changes were also noted in the sensory attributes of the cakes, particularly in taste, softness, and general acceptability. Overall, it was concluded that the use of lupin flour in cake production makes significant contributions to the nutritional content of the cakes.

Keywords: Lupin flour, Physicochemical, Sensory, Cake

1 Introduction

Lupin (*Lupinus sp.*) is a leguminous plant known for its high protein and oil content, distinguishing it as a significant genus within this plant family for its ability to thrive in marginal lands where other legumes cannot grow [1, 2].

Lupin seeds have been utilized in human nutrition and medicine for several millennia. However, over the past two decades, lupin's novel properties have been uncovered, leading to its incorporation in various functional food applications. What makes lupin valuable is its unique combination proteins, oil with desirable omega-6 to omega-3 ratios, oligosaccharides, antioxidants, fibers, and other specific components inherent to this plant. The effects of lupin components are associated with physiological conditions in the human body, including diabetes, hypertension, obesity, cardiovascular diseases, lipid concentration, glycemia, appetite, insulin resistance, and colorectal cancer. The seeds serve as alternatives to meat, egg proteins, and sausages and are used in the production of gluten-free flours, bacterial and fungal fermented products, noodles, and pasta. Lupin seed are also cooked, roasted,

Öz

Bu çalışmada termiye unu ilavesi ile üretilen keklerin fizikokimyasal, tekstürel ve duyuşal özellikleri üzerine olan etkileri araştırılmıştır. Keklere belirli oranlarda ilave edilen termiye unu ile keklerin protein miktarını %6,13'ten %17,50'ye kadar artırdığı tespit edilirken, keklerin özellikle kabuk renk değerlerini de artırdığı belirlenmiştir. Kek örneklerinin hem nem hem de toplam yağ miktarlarının termiye unu ilavesi ile önemli bir fark olmadığı sonucunu ortaya çıkarırken, keklerin hacminde ve karbonhidrat miktarlarında azalmaya yol açtığı tespit edilmiştir. Termiye unu ilavesi ile yapılan kek örneklerinin artan termiye unu miktarı ile kek örneklerinin tekstürel özelliklerinden esneklik, yapışkanlık, sakızimsılık, çiğnenebilirlik ve dirençlilikte azalmaya neden olurken, keklerin sertliğindeki değişiklik önemsiz bulunmuştur. Keklerin duyuşal özellik parametrelerinden olan tat, yumuşaklık ve genel kabul edilebilirlik üzerine istatistiksel olarak önemli değişiklikler olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak kek yapımında termiye unu kullanımının keklerin besin içerikleri üzerine önemli katkıları olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Termiye unu, Fizikokimyasal, Duyusal, Kek

ground, and mixed with cereal flours in various food preparations [3].

Due to its benefits for human nutrition and health, the consumption of lupin plants and seed-derived products as food has increased in recent years [4]. Although lupin is mostly consumed as a snack in some countries, it is used globally in the production of snack foods such as biscuits, cakes, and confectioneries [5].

Cake is the third most consumed baked good after bread and biscuits, and due to its diverse methods of production and formulations, it exists in many varieties. Generally, a cake can be defined as a soft food product prepared from soft wheat flour with 8-9% protein content, sugar, oil, eggs, baking powder, water, milk, flavoring spices, nuts, and, when necessary, certain additives, then baked according to specific procedures [6-8]. The primary ingredients in cake production are flour, eggs, sugar, oil, water, milk, baking powder, surfactants, salt, and vanilla [6,9]. The quality of the cake varies based on the characteristics of the components in the formulation and the technological processes applied; the quantities and functions of the raw materials significantly

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mehmetyetisen@ohu.edu.tr (M. Yetişen)

Geliş / Received: 06.09.2024 Kabul / Accepted: 24.09.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1544618

affect the quality of the final product and contribute to its variety [6,9,10,11].

Cake batter is an emulsion of oil in water, where solid ingredients are dispersed within the liquid phase. The interactions of all the ingredients in the batter during mixing and baking are crucial for the textural quality of the final product, particularly for achieving a high cake volume, characterized by the formation of numerous air cells within the cake, a key quality parameter. During baking, the increase in temperature induces starch gelatinization and protein denaturation; the expansion of air cells is further driven by the increased carbon dioxide production, resulting in a porous, soft, and semi-solid structure of the cake [12,13].

In light of this information, no study has been found that investigates the use of flour (powder) obtained from lupin, whose bitterness has been removed through traditional methods, and then dried, in varying proportions in cake production. This research distinguishes itself from existing literature by focusing on producing a cake that aligns with consumption habits and examining the effects of process parameters on the cake.

2 Materials and method

Lupins (*Lupinus albus*) were sourced from a local producer in the Doğanhisar district of Konya. To remove bitterness, the lupins were soaked in water at 60-70°C for 90 minutes and then left in water at room temperature for 6 days. During this soaking process to remove alkaloids, the water was changed 4-5 times [14]. The de-bittered lupin seeds were dried until they reached a moisture content of 14%. The drying process was carried out using a tray dryer (Nüve KD 200, Ankara, Turkey). The dried lupin seeds were ground into flour using a countertop kitchen grinder (Demsan, Turkey). The flour was then sifted through a 60-80 mesh sieve and stored in airtight containers in the refrigerator to protect it from air and light for analyses and production.

AACC No: 10.90.01 method was followed for cake production. In this method, the amount of wheat flour used was replaced with lupin flour by 10, 15, 20 wt %. The remaining processes were applied according to the

international method. The ingredients and quantities used in cake production are given in Table 1.

2.1 Color analysis of cake

Color measurements for the lupin flour and cake samples were performed using a Hunter Lab Color Quest II Minolta CR-400 (Konica Minolta Sensing, Inc., Osaka, Japan) and the results were expressed as L* value [(0) black-(100) white], a* value [(+) red (-) green] and b* value [(+) yellow (-) blue] [15].

2.2 Texture analysis

TPA (Texture Profile Analysis) was performed on the cake samples 2 hours after baking (TA-XT Plus Texture Analyzer, UK). SMS P/35 cylindrical apparatus was used in the analysis and the test configuration was set as pre-test speed 1 mm/s, test speed 2 mm/s, post-test speed 8 mm/s, strain 10%, time 5 s, trigger force 0.049 N. In texture analysis, hardness, springiness, cohesiveness, gumminess, chewiness and resilience were measured. Cake samples were cut into 38 × 38 × 21 mm (width × depth × height) and texture analysis was performed [16].

2.3 Proximate analysis of cake

The moisture content of the samples was determined according to AACC 44-19 at 135°C for 2.5 hours [17]. Ash content analysis was determined according to AACC 08-01 by burning the organic compounds in the samples in a muffle furnace at 550°C [17]. Protein content analysis of the samples was performed by Kjeldahl method according to AACC 46-12. Analyses were performed on dry matter basis [17]. AACC 30-25 method was used for the determination of total oil in cake [17]. In the analysis on dry matter basis, the samples were extracted with hexane in an automatic oil extraction device (Behr, Germany), the solvent was removed and % crude oil was calculated from the amount of oil obtained. Carbohydrate values of the samples were calculated by the formula % CHO = 100 - (% moisture + % protein + % oil + % ash) [18]. The volumes of the cake samples were determined according to the principle of rapeseed replacement and the results are given in mL [19].

Table 1. Production quantities and ingredients of cakes

Ingredients	Control		A1		A2		A3	
	Quantity (g)	%	Quantity (g)	%	Quantity (g)	%	Quantity (g)	%
Wheat flour	60	20	30	10	15	5	0	0
Lupin flour	0	0	30	10	45	15	60	20
Sugar	80	27	80	27	80	27	80	27
Egg	60	20	60	20	60	20	60	20
Margarin	60	20	60	20	60	20	60	20
Water	35	12	35	12	35	12	35	12
Baking powder	3	1	3	1	3	1	3	1
Salt	0.5	0	0.5	0	0.5	0	0.5	0
Total	298.5	100	298.5	100	298.5	100	298.5	100

Control: 0% Lupin flour. A1: 10% Lupin flour. A2: 15% Lupin flour. A3: 20% Lupin flour.

2.4 Sensory analysis

The samples were subjected to sensory analysis by 12 people among the lecturers, master's and doctoral students at Niğde Ömer Halisdemir University, Faculty of Engineering, Department of Food Engineering. The sensory evaluation criteria for cake were appearance, taste, odor, softness, chewiness, general acceptability. The evaluations were made on a scale of 1-9 [20].

2.5 Statistical analysis

The data from three replicate experiments were analyzed through analysis of variance (ANOVA) using Minitab statistical software, version 18 (USA). The means of the main sources of variation, which exhibited statistically significant differences, were compared using the Tukey's test [21].

3 Results and discussion

The color and proximate analysis results of the cake samples are shown in Table 2 and Table 3, respectively. Crust color values can be affected by non-enzymatic reactions such as Maillard and caramelization [22]. Color measurements were taken from two different regions of the cake: the crust and the inner. The L* values of the cake crust were found to range between 49.6 and 53.55. The addition of lupin flour led to an increase in the L* values of the samples. Additionally, both the a and b values rose with the inclusion of lupin flour, and these changes were statistically significant compared to the control sample. When examining the color values of the inner parts of the cake samples, the L* value was observed to vary between 54.57 and 62.64; however, these changes were not statistically significant ($p>0.05$). Conversely, the increases in a* and b* values resulting from the addition of lupin flour were significant. Because the fractions of refined wheat flour that contain colored pigments were removed, the a* and b* color parameters were lower compared to the samples containing lupin flour [23].

In a study in which cakes were produced with different ratios of soy and lupin milk, it was reported that the color values (L* and b*) of the cakes made with lupin were higher than the color values of the cakes made with soy. [24]. When

the color of the cakes made with fermented lupin powder and fermented soybean powder were examined, it was reported that the L* values of the crusts of the cakes made with lupin powder did not change. However, they stated that there was a decrease in the b* values of the crust of the cake samples. Crumb a* and b* values of FLP cake samples increased, while no change was observed in L* value [25]. In another study in which cakes were produced using lupin and pumpkin powders, an increase in a* and b* color values as well as darkness was observed in the crust and crumb regions of the samples. This increase showed that the ingredients added to the composition of the cakes affected the color formation during baking and caused darker tones in the outer and inner structure. [26].

These findings indicate that the powder has the potential to darken the overall color of the flour and give it warmer tones. In a study involving cakes prepared with fermented lupin powder, the crust color measurements of the cake samples showed L* values ranging from 47.97 to 49.24, a* values from 11.97 to 12.22, and b* values from 23.12 to 25.40. For the inner color of these cakes, the L* values were between 71.26 and 72.28, a* values ranged from -0.45 to -0.72, and b* values ranged from 27.69 to 32.17 [25].

Table 3 displays the proximate analysis results of the cake samples. In the analysis of lupin flour used as raw material in cake making, total oil content was determined as $14.67\pm 1.68\%$ and total protein content was determined as $47.25\pm 0.15\%$. According to the data, no statistically significant differences were observed in the moisture and total oil content across the samples. Although no statistically significant difference was found among the results, the reason for the increase in the total fat content of the cakes is due to the higher fat content of lupin flour (14.67%) compared to wheat flour. This led to an increase in the total fat content as the amount of lupin flour in the formulation increased. However, in ash analysis, the A1 sample had the highest ash content (1.61%). The higher ash content of A1 may be due to the fact that at this ratio the mineral content of the lupin flour blends more effectively with the overall structure of the cake and the other ingredients.

Table 2. Color analysis of cake samples

Samples	Crust			Inner		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
Control	49.60±3.56 ^b	12.41±0.99 ^b	27.46±2.06 ^b	59.49±6.10 ^a	-0.64±0.38 ^b	19.13±1.58 ^b
A1	53.55±3.43 ^a	13.72±1.20 ^a	31.44±2.75 ^a	62.64±0.05 ^a	1.15±0.03 ^{ab}	33.06±0.12 ^a
A2	51.17±2.80 ^{ab}	14.97±0.25 ^a	29.42±3.23 ^{ab}	56.39±9.71 ^a	2.59±0.82 ^a	32.16±6.20 ^{ab}
A3	51.85±1.96 ^{ab}	14.66±0.84 ^a	30.84±1.96 ^{ab}	54.57±1.12 ^a	2.34±0.56 ^a	33.39±1.87 ^a

Means labeled with different letters within the same column are statistically different from each other at the $p\leq 0.05$ significance level.

Table 3. Proximate analysis results of cake samples

Samples	Moisture (%)	Ash (%)	Total Oil (%)	Volume (ml)	Protein (%)	Carbohydrate (%)
Control	11.23±1.87 ^a	1.02±0.01 ^{bc}	17.60±0.12 ^a	83.01±8.72 ^a	6.13±0.13 ^d	64.02±1.86 ^a
A1	10.67±0.73 ^a	1.61±0.07 ^a	20.03±1.51 ^a	68.67±6.66 ^{ab}	12.25±0.11 ^c	55.44±1.07 ^b
A2	8.69±0.90 ^a	0.60±0.25 ^c	23.61±4.89 ^a	59.02±6.24 ^b	14.88±0.08 ^b	52.22±2.35 ^{bc}
A3	11.99±2.52 ^a	1.23±0.24 ^{ab}	20.20±2.78 ^a	61.01±1.02 ^b	17.50±0.12 ^a	49.08±1.88 ^c

Means labeled with different letters within the same column are statistically different from each other at the $p\leq 0.05$ significance level.

So, this mineral content may give different results at lower or higher ratios. The low ash content in A2 can be explained by the fact that the increased amount of flour did not make the cake denser and homogenize the mineral distribution or interact with other ash-forming components in the cake. The cake samples' volumes ranged from 59 to 83 ml, and the addition of lupin flour reduced the sample volumes. The protein values of the cake samples ranged from 6.13% to 17.50%, and statistically significant increases in protein content were observed with the addition of lupin flour in cake production ($p \leq 0.05$). The protein content of lupin flour was determined to be $47.25\% \pm 0.15$. As a result, the use of lupin flour in different ratios increased the protein content of the cakes. It was found that the addition of lupin flour to the cake samples reduced the carbohydrate content of the samples. In the literature, it was found that the moisture content of the cakes made with fermented lupin ranged between 25.80% and 26.42%, ash content between 1.56% and 1.66%, total oil content between 19.02% and 19.98%, and protein content of the samples ranged between 10.83% and 13.20% [25]. In the cake study conducted with 5%, 10%, and 15% lupin flour ratios, the moisture, protein, ash, and oil contents were found to be in the ranges of 11.35-11.54%, 13.73-16.28%, 0.55-0.85%, and 2.04-2.87%, respectively. According to the protein, ash, and oil results, it was determined that the proportions of these components increased with the rising amount of lupin flour [27]. In another study, the protein amounts of cakes made using 45-60-75% split bean extruded flour were found to be between 8.94 and 10.28 [28]. As a result of the studies, it was determined that the protein content of protein-enriched brown rice cakes prepared using brown rice flour enriched with different levels (10%, 20%, 30%) of Bombay locust powder varied between 18.40% and 24.94% [29]. The protein levels in cakes made from the commercial mix, commercial mix supplemented with chia mucilage, new control mix, and new mix with added chia mucilage were found to be 7.74%, 7.24%, 7.56%, and 8.47%, respectively. These findings suggest that the inclusion of chia mucilage may influence the protein content of the cakes [30]. The protein values of the cake enriched with moringa leaf powder and ripe banana flour ranged between 6.57% and 8.81%, while the protein content of the cake made with 100% wheat flour was 5.79% [31]. The differences in total oil and moisture content are likely due to the different formulations used in cake making.

Texture characteristics are an important outcome for consumer acceptance of baked food products [32]. The textural characteristics of the specimens were presented in

Table 4. The addition of lupin flour did not have a statistically significant effect on the hardness parameter. However, significant differences were found in the results of springiness, cohesiveness, gumminess, and chewiness. It was determined that the addition of lupin flour reduced the elasticity and stickiness properties of the cakes. In a study of biscuits made with lupin powder, the hardness and breakability of the biscuits increased with an increase in the concentration of lupin flour by $\geq 20\%$ [33]. In another study, cakes made with almond baru flour showed greater hardness and chewiness, but reduced springiness and stickiness [34]. It was reported that the textural properties (hardness, gumminess, and chewiness) of the cake samples made by adding apple peel and apple peel pulp increased [35]. Pregelatinized sweet potato flour was produced using tumble drying method and its effects on cake and frozen cake properties were evaluated. The addition of pregelatinized sweet potato flour to wheat flour increased the hardness of the cakes [36].

The sensory analysis results of the cake samples are given in **Table 5**. According to the sensory analysis results, there was no statistically significant difference in the parameters of appearance, odor, and chewiness ($p > 0.05$). However, decreases in taste and softness parameters were observed inversely proportional to the increased addition of lupin flour. The most preferred cake samples were A1 and A2, following the control sample. In a study on making biscuits from lupin powder, the results of sensory evaluation revealed that there was an improvement in color with the substitution of lupin flour, while taste, flavor, texture and general acceptability did not change significantly up to 20% substitution [33]. In a similar study, cake enriched with different levels of lupin flour showed no significant difference in taste, odor and overall acceptability compared to unenriched cake (control) [27]. Another study reported that incorporating fermented lupin powder at levels above 20% led to a reduction in the overall acceptability scores of the cakes [25]. Lupin cake samples were shown in **Figure 1**.



Figure 1. Lupin cake samples, left to right; control, A1, A2 and A3

Table 4. Texture properties of cake samples

Samples	Hardness (g)	Springiness	Cohesiveness	Gumminess	Chewiness	Resilience
Control	409.8±67.5 ^a	0.88±0.03 ^a	0.63±0.06 ^a	257.1±17.2 ^a	226.8±18 ^a	0.21±0.02 ^a
A1	343.3±69.3 ^a	0.81±0.03 ^{ab}	0.56±0.01 ^{ab}	191±42.4 ^{ab}	154.8±37 ^{ab}	0.21±0.01 ^a
A2	426.6±73.2 ^a	0.73±0.03 ^{bc}	0.46±0.03 ^b	195.6±29.4 ^{ab}	142.5±15.97 ^{bc}	0.19±0.01 ^a
A3	355±20.4 ^a	0.69±0.05 ^c	0.22±0.1 ^c	88.6±70.2 ^b	60.7±45.7 ^c	0.11±0.03 ^b

Means labeled with different letters within the same column are statistically different from each other at the $p \leq 0.05$ significance level.

Table 5. The results of sensory properties of cake samples

Samples	Appearance	Taste	Odor	Softness	Chewiness	General Acceptability
Control	7.75±1.06 ^a	7.67±1.44 ^a	7.17±2.08 ^a	7.58±1.24 ^a	7.33±1.30 ^a	7.58±1.51 ^a
A1	6.58±1.93 ^a	6.42±1.62 ^{ab}	6.5±1.24 ^a	6.92±1.44 ^{ab}	6.92±1.56 ^a	6.58±1.68 ^{ab}
A2	6.17±1.8 ^a	6.08±1.62 ^{ab}	6.0±1.48 ^a	5.67±1.83 ^{bc}	6.75±1.49 ^a	6.75±1.36 ^{ab}
A3	6.17±1.34 ^a	5.17±1.85 ^b	5.83±1.75 ^a	5.00±1.86 ^c	5.75±1.49 ^a	5.75±1.22 ^b

Means labeled with different letters within the same column are statistically different from each other at the p≤0.05 significance level.

4 Conclusion

In this study, lupin flour was investigated as a potential ingredient in cake production, focusing on its impact on various physicochemical and sensory attributes. The proximate analysis revealed that lupin flour significantly increased the protein content of the cakes, confirming its potential as a protein-enhancing ingredient. In the analysis of the cake samples, an increase in L*, a*, and b* values was observed in the crust, while no change was detected in the L* value of the inner. However, statistically significant increases were found in the a* and b* values of the inner. Additionally, although no significant differences were found in moisture and total oil content among the samples, the inclusion of lupin flour significantly decreased the volume of the cakes. It was concluded that there was an inverse proportion between the amount of carbohydrate and the amount of lupin flour added to the cake samples. According to the texture analysis results of the cakes, decreases were observed in springiness, cohesiveness, gumminess, chewiness and resilience parameters. However, no change was detected in the hardness value of the cakes. Sensory evaluation highlighted improvements in taste and softness parameters with increasing lupin flour content, although appearance, odor, and chewiness remained unchanged. In conclusion, the incorporation of lupin flour in cake formulations presents an opportunity to boost protein content and modify texture properties, while influencing color attributes to varying extents.

Acknowledgement

This study was supported by TUBITAK under the 2209-A University Students Research Projects Support Program with the application number 1919B012322752.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 17%

References

- [1] T. Baytop, Türkçe bitki adları sözlüğü (No:78). Atatürk Kültür, Dil ve Tarih Yüksek Kurumu-Türk Dil Kurumu Yayınları, 1994.
- [2] M. Tanur Erkoyuncu, M. Yorgancılar and E. Atalay, Farklı demir dozlarının lüpen bitkisinde fide döneminde fotosentetik verime etkisi. 11. Tarla Bitkileri Kongresi, 7-10 Eylül 2015, Çanakkale, 434-437, 2015.
- [3] J. Prusinski, White lupin (*Lupinus albus* L.) nutritional and health values in human nutrition a Review. Czech Journal of Food Sciences, 35 (2), 95-105, 2017. <https://doi.org/10.17221/114/2016-CJFS>
- [4] R. D. J. Sandoval-Muñiz, B. Vargas-Guerrero, T. J. Guzmán, P. M. GarcíaLópez, A. L. Martínez-Ayala, J. A. Domínguez-Rosales and C. M. Gurrola-Díaz, Lupin gamma conglutin protein: Effect on Slc2a2, Gck and Pdx-1 gene expression and GLUT2 levels in diabetic rats. Revista Brasileira de Farmacognosia, 28, 716-723, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.bjp.2018.08.002>
- [5] M. Mülayim and R. Acar, Konya'nın yöresel değeri ak acıbakla (Lüpen=Termiye) bitkisi ve kullanımı. Konya Ticaret Borsası Dergisi, 11(30), 44-49, 2008.
- [6] K. Ergün, Dondurularak kurutulmuş kivi püresi tozu kullanılarak hazırlanan keklerde pişirme yöntemi ve formülasyonun kalite kriterlerine etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2012.
- [7] E. Giritlioğlu, Kinoa (*Chenopodium quinoa willd.*) ve şeker otu (*Stevia rebaudiana bertonii*) kullanılarak yeni bisküvi ve kek formülleri geliştirme üzerine bir araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Osmaniye, 2017.
- [8] C. Topkaya, Nar kabuğu tozu ilavesinin keklerin besinsel, duyuşal ve mikrobiyolojik özelliklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2017.
- [9] G. Köklü, Pandispanya yapımında bazı yüzey aktif maddelerin kek nitelikleri üzerindeki etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2007.
- [10] İ. Ö. Gözükar, Balkabağı tozunun fizikokimyasal ve sorpsiyon özellikleri üzerine kurutma metodlarının etkisi ve balkabağı tozunun kek üretiminde kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013.
- [11] O. Noğay, Farklı yöntemlerle elde edilen nar çekirdek tozlarının muffin kek kalite özelliklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2014.
- [12] Y. Ö. Alifakı, Nohut unu ilavesinin kekin dielektrik özellikleri ve kalite parametreleri üzerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2013.
- [13] N. Bozdoğan, Glutensiz kek formülasyonlarında hidrokolloid ve diyet lifi kullanımının hamur reolojisi ve kek kalitesi üzerine olan etkilerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2015.
- [14] M. Yorgancılar, E. Atalay, and M. Babaoğlu, Acılığı giderilmiş termiye tohumlarının (lüpen= *Lupinus albus*

- L.) mineral içeriği, Selçuk Tarım ve Gıda Bil. Der., 23, 50, 10-15, 2009.
- [15] M. Jarpa-Parra, L. Wong, W. Wismer, F. Temelli, J. Han, W. Huang and L. Chen, Quality characteristics of angel food cake and muffin using lentil protein as egg/milk replacer, International Journal of Food Science and Technology, 52(7):1604-1613, 2017. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13433>
- [16] C. Baltacıoğlu and M. Uyar, Kabak (*Cucubita pepo* L.) tozunun kek üretiminde potansiyel kullanımı ve kek kalite parametrelerine etkisi. Akademik Gıda, 15(3), 274-280, 2017. <https://doi.org/10.24323/akademik-gida.345267>
- [17] AACC, 1990, American Association of Cereal Chemists, U.S.A.
- [18] N. Karaağaoğlu, E. Karabudak, S. Yavuz, O. Yüksek, D. Dinçer, G. Tosunbayraktar ve H. F. Eren, Çeşitli ekmeklerin protein, yağ, nem, kül, karbonhidrat ve enerji değerleri, Gıda, 33 (1), 19-25, 2008.
- [19] L. Román, A. González, T. Espina and M. Gómez, Degree of roasting of carob flour affecting the properties of gluten-free cakes and cookies. J Food Sci Technol, 54(7): 2094-2103, 2017. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2649-x>
- [20] T. Ozer, M. Yetisen, C. Baltacıoğlu, H. Baltacıoğlu, H. Uslu and H. Tanguler, Use of waste fermented black carrot powder dried by different methods as a substitute in noodle production. Journal of Food Measurement and Characterization, 1-13, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02671-y>
- [21] O. Düzgüneş, T. Kesici, O. Kavuncu ve F. Gürbüz, Araştırma ve deneme metotları, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, 1021, No:295, Ankara, 1987.
- [22] R. Randhir, Y. I. Kwon and K. Shetty, Effect of thermal processing on phenolics, antioxidant activity and health-relevant functionality of select grain sprouts and seedlings. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 9(3), 355-364, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.10.004>
- [23] T. Cankurtaran and N. Bilgiçli, Influence of wheat milling by-products on some physical and chemical properties of filled and unfilled fresh pasta. Journal of food science and technology, 56, 2845-2854. 2019. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03705-w>
- [24] M. Aslan and N. Bilgiçli, The comparison of lupin milk with soy milk as an alternative egg substitute for cake production. Journal of Food Processing and Preservation, 46(5), e16572, 2022. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16572>
- [25] M. Aslan and N. Bilgiçli, Improvement of functional cake formulation with fermented soy (*Glycine max*) and lupin (*Lupinus albus* L) powders. International Journal of Gastronomy and Food Science, 26, 100429, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100429>
- [26] T. Cankurtaran-Kömürcü & N. Bilgiçli, Improvement of nutritional properties of regular and gluten-free cakes with composite flour. Food Science and Technology International, 10820132231211929, 2023. <https://doi.org/10.1177/10820132231211929>
- [27] A. R. Ahmed, Influence of chemical properties of wheat-lupine flour blends on cake quality. American Journal of Food Science and Technology, 2(2), 67-75, 2014. <https://doi.org/10.12691/ajfst-2-2-4>
- [28] P.Z. Bassinello, J.A.C. Bento, L.D.O.F. Gomes, M. Caliarı and B.D. Oomah, Nutritional value of gluten-free rice and bean based cake mix. Ciência Rural, 50, e20190653. 2020. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190653>
- [29] S. Indriani, M.S.B. Ab Karim, S. Nalinanon and S. Karnjanapratum, Quality characteristics of protein-enriched brown rice flour and cake affected by Bombay locust (*Patanga succincta* L.) powder fortification. Lwt, 119, 108876, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108876>
- [30] S. S. Fernandes, G. Filipini and M. de las Mercedes Salas-Mellado, Development of cake mix with reduced fat and high practicality by adding chia mucilage. Food Bioscience, 42, 101148, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101148>
- [31] R. A. Roni, M.N.H. Sani, S. Munira, M.A. Wazed and S. Siddiquee, Nutritional composition and sensory evaluation of cake fortified with moringa oleifera leaf powder and ripe banana flour. Applied Sciences, 11(18), 8474, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11188474>
- [32] A. Aydogdu, G. Sumnu and S. Sahin, Effects of addition of different fibers on rheological characteristics of cake batter and quality of cakes. Journal of Food Science and Technology, 55, 667-677, 2018. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2976-y>
- [33] V. Jayasena and S. M. Nasar-Abbas, Effect of lupin flour incorporation on the physical characteristics of dough and biscuits. Quality Assurance and Safety of Crops & Foods, 3(3), 140-147, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1757-837X.2011.00100.x>
- [34] A. F. Ramos, G.D.R.L. Mendes, R. S. Cruz, F.N. Silva, G.P. Camilloto, H. F. de Souza and I.V. Brandi, Development of cakes with almond baru flour: chemical composition and its correlations with texture profile analysis. British Food Journal, 125(4), 1206-1216, 2023. <https://doi.org/10.1108/BFJ-08-2021-0866>
- [35] A. Hosseini, and F. Pazhouhandeh, Production of enriched cakes by apple pulp and peel powder and evaluation of chemical, functional and textural properties. Vitae, 30(1), 2023. <https://doi.org/10.17533/udea.vitae.v30n1a349519>
- [36] S. Chittrakorn and G. C. Bora, Production of pregelatinized sweet potato flour and its effect on batter and cake properties. Journal of Food Processing and Preservation, 45(12), e16019, 2021. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16019>





Eriyik yığma modelleme ile farklı yazdırma parametrelerinde üretilen yapıların titreşim sönümlenme özelliklerinin torna tezgâhı üzerinde deneysel araştırılması

Experimental investigation of the vibration damping properties of structures produced with different printing parameters on a lathe using fused deposition modeling

Çağlar Sevim^{1,*} , Mehmet Parlak² 

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

² Erciyes Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 38280, Kayseri, Türkiye

Öz

Eriyik yığma modelleme teknolojisinin gelişimi ile istenilen özelliklerde tasarımı yapılan malzemelerin ve yapıların üretilmesi mümkün hale gelmiştir. Özellikle yazdırma açısı, doluluk oranı ve içyapı gibi yapısal yazdırma parametrelerinin, üretilen yapının mekanik özellikleri üzerinde son derece etkili olduğu yapılan çalışmalarda ortaya konulmuştur. Bu çalışmada ise, farklı doluluk oranı ve içyapılarda üretilen yapıların titreşim sönümlenme özellikleri, bir torna tezgâhı üzerinde deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler sonucunda, içyapı ve doluluk oranının yapının sönümlenme özelliği üzerinde etkili olduğu saptanmış ve bu sayede farklı yazdırma parametreleriyle uygulamaya özel ve istenilen sönüm özelliğini gösterebilecek izolatörlerin tasarlanabileceği ortaya konulmuştur.

Anahtar kelimeler: Eriyik yığma modelleme, 3B yazıcı, Doluluk oranı, İçyapı, Titreşim sönümlenme, Eklemeli imalat

1 Giriş

Genellikle 3 boyutlu yazdırmayı ifade eden eklemeli imalat 1980'lerin sonundan itibaren ortaya çıkmıştır. Son yıllarda; hızlı prototipleme, ihtiyaca uygun yüksek seviyede özelleştirme ve uygun maliyet gibi birçok avantajından dolayı endüstrinin havacılık [1], tıp [2], biyo-üretim [3] vb. alanlarında geniş ölçüde kullanılmaktadır. Malzeme ekstrüzyon teknolojisi, eriyik yığma modelleme (EYM) olarak da bilinir ve ISO/ASTM 52900 [4] standartlarına göre tanımlanmıştır. Bu süreçte, filament adı verilen hammadde, ısıtılmış bir yazdırma ağızına itilerek yarı sıvı hale getirilir ve erimiş malzeme yazdırma ağızından çıkarılarak nihai yapının katmanlarını oluşturmak için ekstrüde edilir [5].

EYM teknolojisinin hızlı gelişimi bu konudaki akademik araştırmaların da sayısını önemli ölçüde artırmıştır. Özellikle bu teknolojiyle üretilen yapıların mekanik özelliklerini ve davranışlarını ortaya koymak için yapılan çalışmalar ön plana çıkmaktadır [6, 7]. Eriyik Yığma Modelleme (EYM) ile üretilen parçaların mekanik özellikleri, geleneksel üretim teknikleriyle üretilen yapıların aksine, sadece hammadde türüne bağlı değildir. Aynı zamanda, yazdırma parametreleri

Abstract

With the advancement of fused deposition modeling technology, it has become possible to produce materials and structures designed with desired properties. Studies have shown that structural printing parameters such as printing angle, infill density, and internal structure significantly affect the mechanical properties of the produced structure. In this study, the vibration damping properties of structures produced with different infill densities and internal structures were experimentally investigated on a lathe. The experiments revealed that internal structure and infill density significantly influence the damping properties of the structure. Consequently, it was demonstrated that isolators with application-specific and desired damping properties can be designed using different printing parameters.

Keywords: Fused deposition modelling, 3D printing, Infill rate, Internal structure, Vibration damping, Additive manufacturing

de bu özellikleri büyük ölçüde etkilemektedir. Bu parametreler üretim parametreleri ve yapısal parametreler olmak üzere iki ana kısma ayrılabilir. Üretim parametreleri yazdırma ağız sıcaklığı ve yazdırma hızı iken, yapısal parametreler ise doluluk oranı, yazdırma açısı, yazdırma ağız çıkış büyüklüğü ve katman kalınlığıdır [8]. Parametrelerin fazla sayıda ve karmaşık olmalarına rağmen bunlar arasındaki ilişki ve özellikleri birçok çalışmada yer almıştır [9-13]. Bununla birlikte bu çalışmanın da konusu olan titreşim sönümlenme özelliği ile yazdırma parametreleri arasındaki ilişkileri de ortaya koymaya yönelik farklı çalışmalar da yapılmıştır [14-19]. Bu çalışmalardan görüleceği üzere EYM teknolojisi ile üretilen yapılar titreşim sönümlenme özelliğine sahip olmakla beraber literatürde doğrudan uygulamaya yönelik bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Bilindiği üzere mekanik titreşimler makineler üzerinde gürültü, yorulma, potansiyel arızalar, parçaların gevşemesi gibi olumsuz etkilere sebep olmaktadır. Ayrıca tornalama, frezeleme gibi işlemler esnasında iş parçasının yüzey kalitesi üzerinde de olumsuz etkilere sebep olmaktadır [20, 21]. Bu

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: caglar.sevim@ohu.edu.tr (Ç. Sevim)

Geliş / Received: 29.07.2024 Kabul / Accepted: 25.09.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1521381

olumsuz etkileri azaltmak ve kaçınmak için, makine ile taban arasında esnek izolatörler kullanılmaktadır. Bu izolatörler, titreşimlerin mekanik enerjisini depolar ve bir sönümleme mekanizması aracılığıyla bu enerjiyi dağıtır. Özellikle tornalama gibi yüzey kalitesinin önemli olduğu işlemlerde titreşim yalıtımı çok daha önemli hale gelmektedir [22].

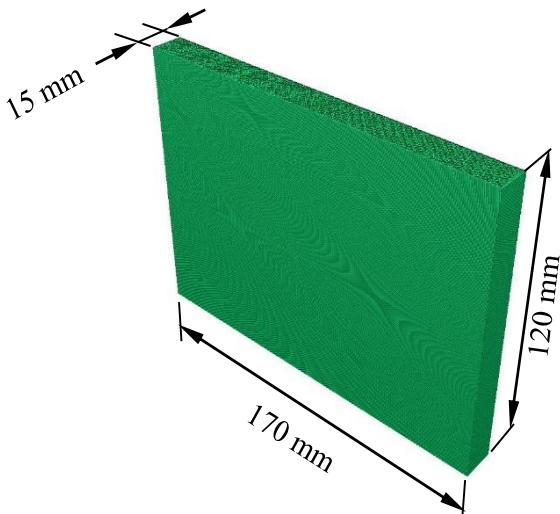
Titreşim yalıtımı için endüstride kullanılan birçok farklı tipte yalıtım elemanı bulunmaktadır. Ayrıca, yukarıda bahsedildiği üzere 3B yazıcıların son yıllarda yaygınlaşması, çeşitli uygulamalar için istenmeyen mekanik titreşimlerin izolasyonu ve kontrolü için farklı alanlarda hızlı çözümlerin geliştirilmesine yol açmıştır. Baskı işlemi sırasında titreşimin olumsuz etkilerini azaltmak için çeşitli 3B baskılı titreşim yalıtıcı tasarımları önerilmiştir, ancak titreşim yalıtım performansını değerlendirmek için bunlar üzerinde bilimsel olarak titiz bir çalışma yapılmamıştır. Eklemeli imalat yöntemini kullanmanın titreşim yalıtımı için avantajı, belirli bir uygulama için bir izolatör imal etmek amacıyla geometri veya malzemeyi hızlı bir şekilde değiştirerek tasarım ve üretim sürecinin hızlı olmasıdır.

Bu çalışmada EYM ile üretilen yalıtım elemanlarının masa tipi bir torna tezgâhında meydana gelen titreşimleri ne derece sönümleyebildiği ve önemli yazdırma parametrelerinden biri olan doluluk oranının ve içyapı deseninin sönümleme üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılmıştır.

2 Sönümleyicinin tasarımı

Şekil 1’de geometrik büyüklükleri verilen numuneler, %80 ve %30 doluluk oranlarında, üçgen ve zigzag desenleri ile 3B yazıcıda üretilmiştir.

Çalışmada, %100 PLA granül esaslı filament kullanılmıştır. PLA (Polilaktik Asit), biyolojik olarak parçalanabilir olması, çevre dostu bir malzeme olması ve 3D yazıcılarla kolay işlenebilmesi nedeniyle tercih edilmiştir. Ayrıca, düşük büzülme oranı ve boyutsal kararlılığı sayesinde karmaşık geometrilere sahip parçaların yüksek doğrulukla üretimine olanak tanımaktadır. PLA’nın geniş kullanım alanı ve mekanik özellikleri, bu çalışmada titreşim

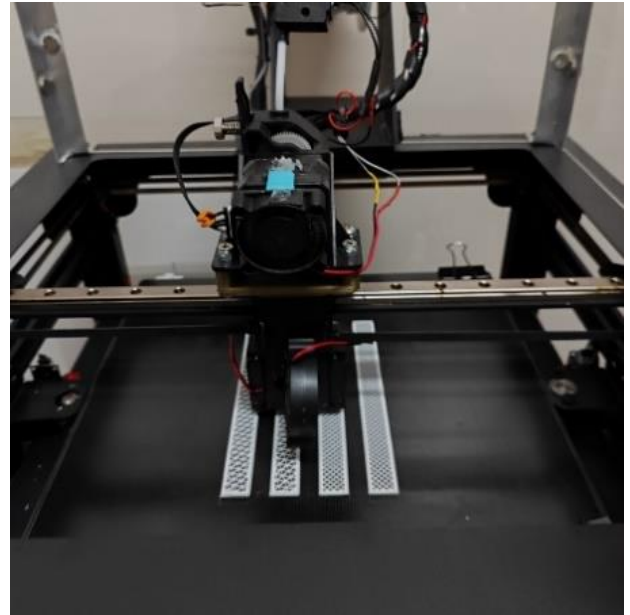


Şekil 1. Numunelerin boyutları ve içyapıları

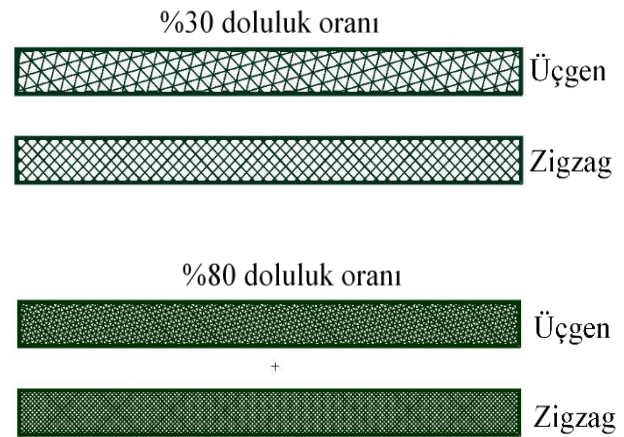
sönümleme performansını analiz etmek için uygun bir malzeme olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan filamentin çapı $1,75 \text{ mm} \pm 0,05$, yoğunluğu $1,252 \text{ g/cm}^3$ ve ideal yazdırma sıcaklığı $190\text{-}230 \text{ }^\circ\text{C}$ ’dir.

3B yazıcı olarak; 300mm x 300mm ısıtmalı baskı alanına sahip 0,01 mm yazdırma hassasiyetli, X, Y ve Z hareket eksenlerinde lineer kaymalı yataklara ve bilyeli arabalara sahip Sapphire Plus 3B yazıcı kullanılmıştır (Şekil 2).

3B yazıcının filament besleme ünitesi ise, yazdırma doğruluğunu artırmak amacıyla, X eksenindeki hareketli yazdırma kafasında bulunan besleyici motor ünitesi ile doğrudan besleme yapacak şekilde değiştirilmiş, parçalar eşit yazdırma şartlarında yazdırılmıştır. Ölçü doğruluğu sağlamak için yazdırma öncesi yazıcı kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Böylece numuneler istenilen ölçülerde $\pm 0.01 \text{ mm}$ hassasiyet ile yazdırılmıştır.



Şekil 2. Numunelerin EYM ile üretimi



3 Deneysel sistem

Deneyler, Şekil 3'te görüldüğü üzere masaüstü torna tezgâhi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Torna tezgâhi ve torna tezgâhının bulunduğu masa üzerindeki düşey titreşim seviyelerinin ölçülmesi için torna tezgâhi ve masa üzerine ivmeölçerler monte edilmiştir. Deneysel çalışmalarda Brüel & Kjaer 3560B tipi veri toplama sistemi ve 4513B tipi 4 adet ivmeölçer kullanılmıştır. Torna tezgâhi tahrik motoru, çevrim oranları değiştirilebilen kayış kasnak sistemlerine bağlı olarak hareketi aynaya iletmekte ve farklı çalışma hızlarının elde edilmesine imkân sağlamaktadır.

Bu çalışmada deneyler, torna işlemlerinde en sık kullanılan 370 ve 740 d/dk'lık hızlarda gerçekleştirilmiştir.

EYM ile üretilen izolatörler torna tezgâhi ayakları ve masa arasına yerleştirilmiştir. İvmeölçerler, düşey ve yatay titreşimleri elde edebilmek amacıyla, Şekil 4'te görüldüğü üzere, torna tezgâhi gövdesine yerleştirilmiştir. Diğer sensörler ise, torna tezgâhi kaynaklı titreşimlerin iletimini incelemek amacıyla düşey ve yatay eksenlerde masa ayaklarına yerleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar itibarıyla yatay yönde elde edilen titreşim değerleri her bir deney için çok düşük seviyelerde ve aynı değerlerde meydana geldiğinden değerlendirmeye alınmamıştır.

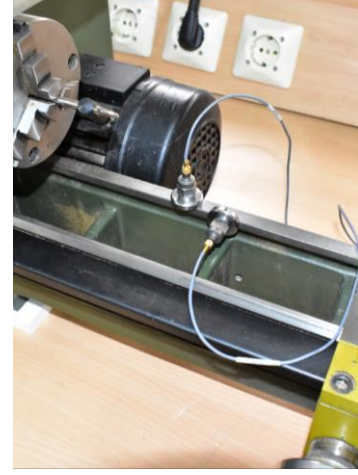
4 Sonuçlar

Deneyler sonucunda elde edilen titreşim grafikleri Şekil 5 ve Şekil 6'da sunulmaktadır. Şekil 5a'da yer alan titreşim grafiği, üçgen içyapıya sahip ve %30 ile %80 doluluk oranlarında oluşturulmuş yapıların izolatör olarak kullanılmasıyla elde edilmiştir. Şekil 5b'deki titreşim grafiği ise aynı doluluk oranlarına sahip ancak zigzag içyapıya sahip yapıların titreşim performansını göstermektedir.

Şekil 5'te görüldüğü gibi, 370 d/dk'lık çalışma hızı için hem içyapı hem de doluluk oranı açısından önemli bir titreşim farkı gözlemlenmemiştir. Torna tezgâhi titreşim seviyeleri, her iki içyapı ve doluluk oranında 0,5-0,6 m/sn² değerleri arasında değişim göstermektedir.

Şekil 6a ve 6b'den elde edilen verilere göre, 740 d/dk hızda çalışan torna tezgâhında alınan titreşim değerleri

arasında hem doluluk oranı hem de içyapı açısından belirgin farklar bulunmaktadır. Şekil 6a, üçgen içyapıya sahip yapıların %30 ve %80 doluluk oranlarındaki titreşim değişimlerini göstermektedir.

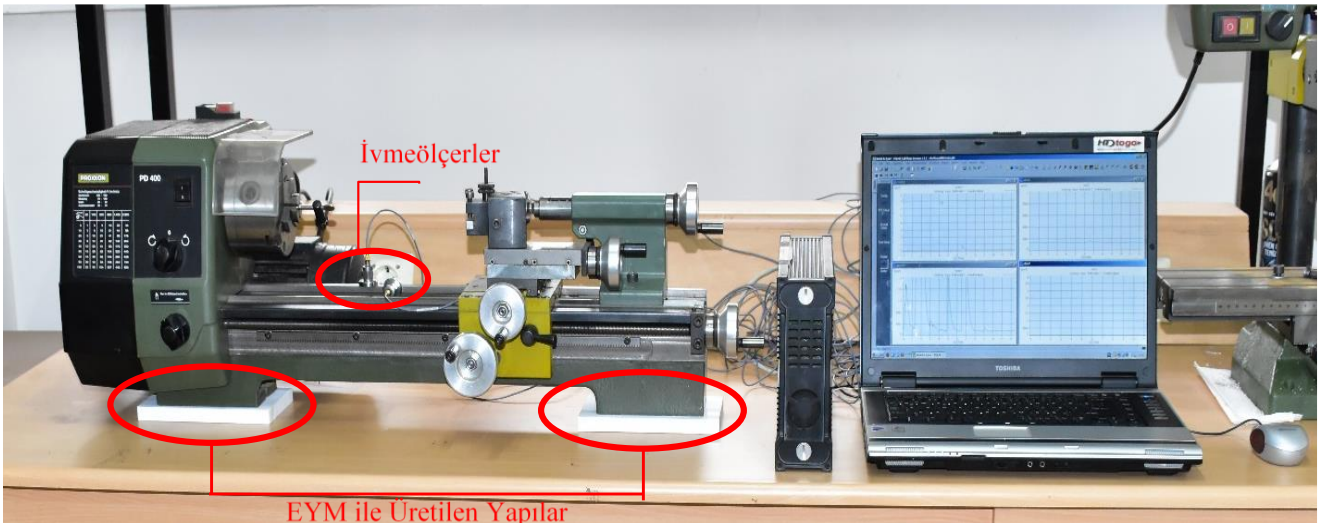


(a)



(b)

Şekil 4. İvmeölçerlerin konumları (a) torna, (b) zemin

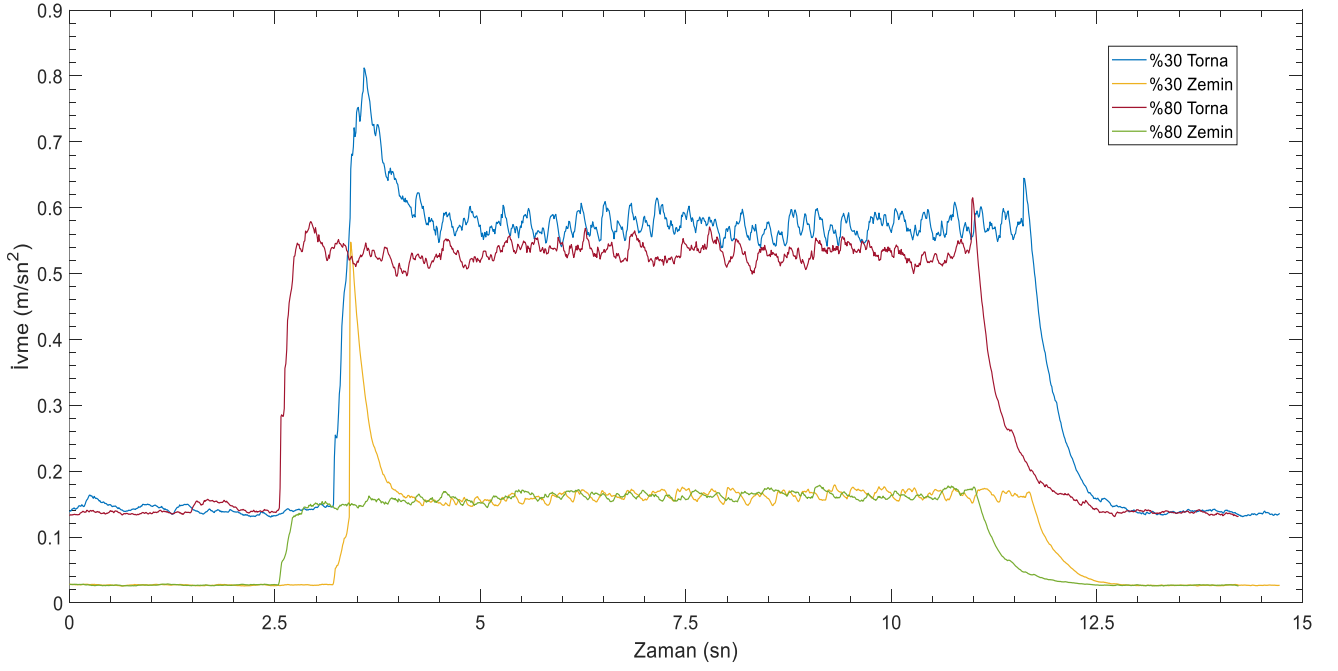


Şekil 3. Deneysel sistem

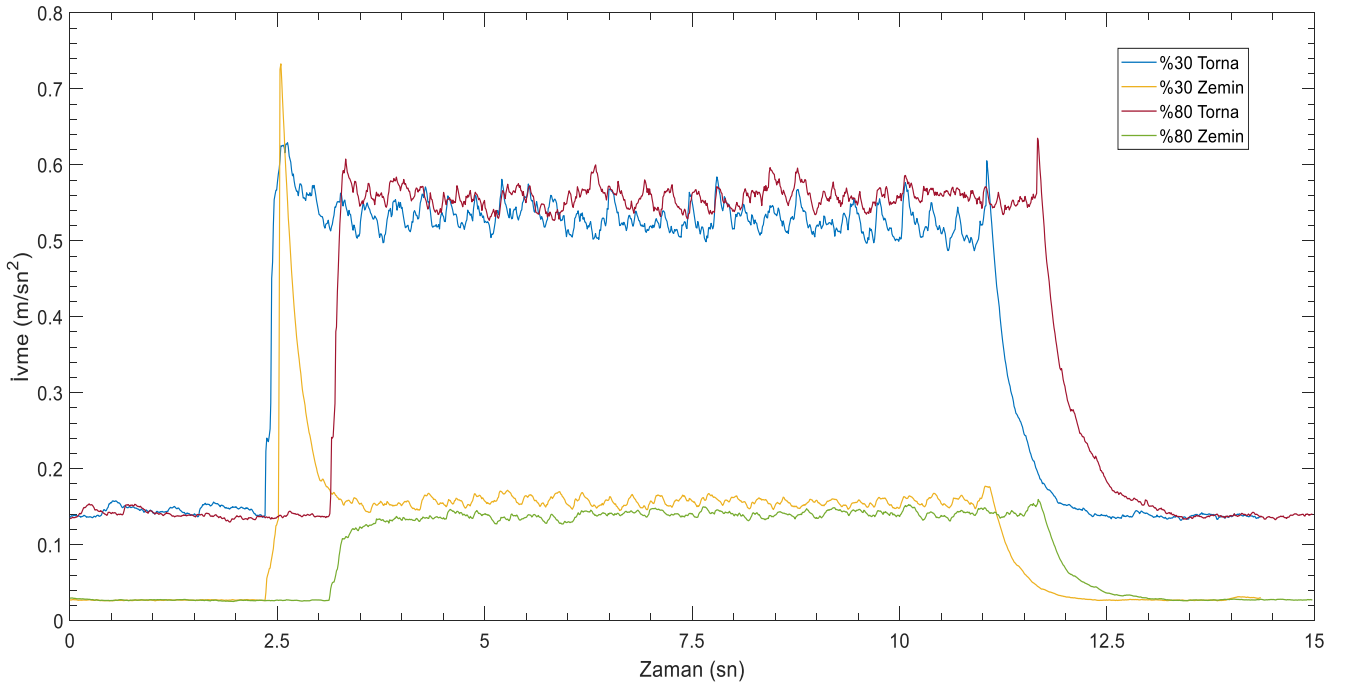
Torna tezgâhı düşey titreşim değerleri, %30 doluluk oranı ile üretilen yapı sönümlenme elemanı olarak kullanıldığında 1,6-1,8 m/sn² arasında değişirken, %80 doluluk oranı ile üretilen yapı kullanıldığında ise bu değerler 1-1,2 m/sn² aralığında değişim göstermektedir. Zemin titreşim değerlerinde ise anlamlı bir fark bulunmamaktadır.

Şekil 6b' de, zigzag içyapıya sahip ve %30 ile %80 doluluk oranlarında üretilmiş yapıların izolatör olarak

kullanılmasıyla elde edilen titreşim değerleri görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere, torna tezgâhı düşey titreşimleri %30 doluluk oranında 1,2-1,6 m/sn² arasında değişim gösterirken, %80 doluluk oranında bu değerler 1-1,2 m/sn² arasında değişmektedir. Zemin üzerindeki titreşim değerlerinde belirgin bir fark bulunmamakla birlikte, tüm yapılarda yaklaşık 0,3 m/sn² civarında sabit kalmaktadır.

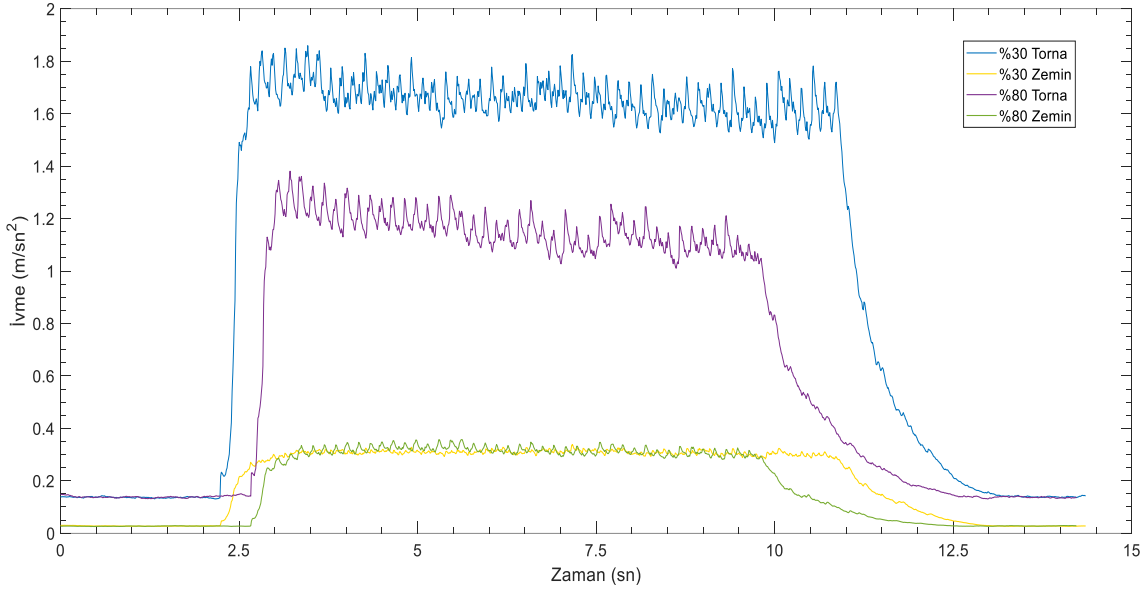


(a)

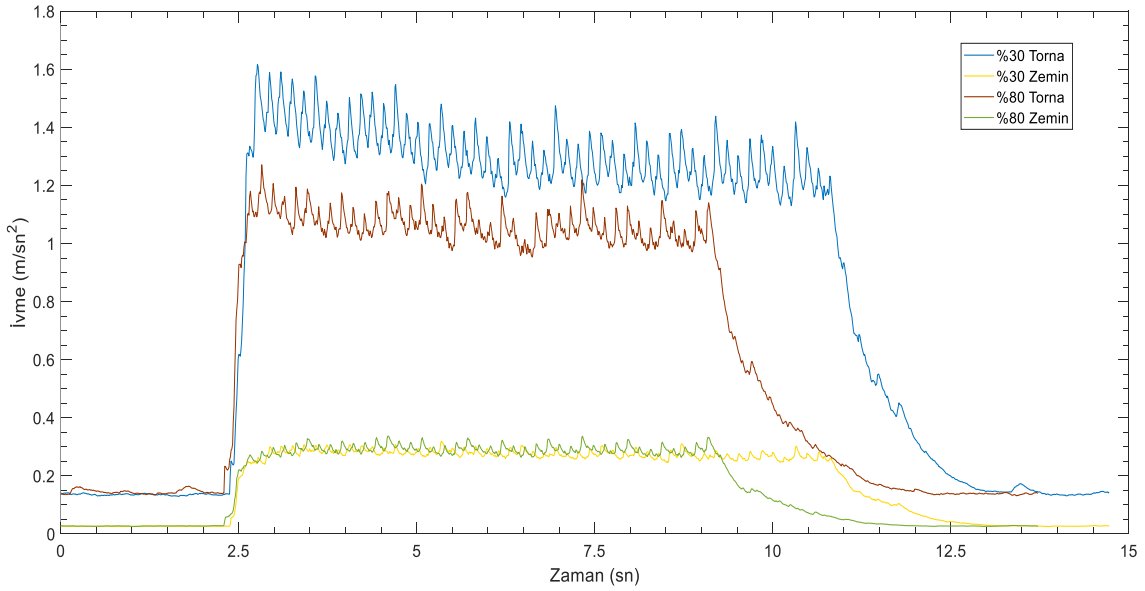


(b)

Şekil 5. 370 d/dk hızında elde edilen titreşim grafikleri (a) üçgen içyapı, (b) zigzag içyapı



(a)



(b)

Şekil 6. 740 d/dk hızında elde edilen titreşim grafikleri (a) üçgen içyapı, (b) zigzag içyapı

5 Değerlendirme

Bu çalışmada, son yıllarda kullanımı önemli derecede artan eklemeli imalat metotlarından olan EYM ile üretilmiş yapıların izolatör olarak kullanımında yazdırma parametrelerinin titreşim sönümlenme üzerine etkileri incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, yapısal yazdırma parametrelerinden doluluk oranı, oluşturulan yapının titreşim sönümlenme performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Bunun yanı sıra, içyapı da bu bağlamda önemli bir değişken olarak değerlendirilmektedir. Daha kapsamlı bir çalışmada, doluluk oranına ek olarak diğer yazdırma parametrelerinin de etkisi daha net bir şekilde ortaya konulabilir. Bu sayede, uygun bir tasarımla,

malzemenin rijitlik ve sönüm özellikleri, seçilen uygun malzeme tipi, fiziksel parametreler ve topoloji ile optimize edilebilir. Bu değişikliklerle titreşim seviyesi azaltılabilir ve kontrol altına alınabilir. Sonuç olarak, uygulamaya özel, titreşimi istenilen seviyelere çekebilecek nitelikte izolatörler tasarlanabilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %0

Kaynaklar

- [1] S.C. Joshi and A. A. Sheikh, 3D printing in aerospace and its long-term sustainability. Virtual and Physical

- Prototyping, 10, 175-185, 2015. <https://doi.org/10.1080/17452759.2015.1111519>
- [2] A. Aimar, A. Palermo and B. Innocenti, The role of 3D printing in medical applications: A state of the art, *Journal of Healthcare Engineering*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/5340616>
- [3] H. Gao, W. Zhang, Z. Yu, F. Xin and M. Jiang, Emerging Applications of 3D printing in biomanufacturing, *Trends Biotechnology*, 39(11), P1114-1116, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2021.04.005>
- [4] ISO/TC 261; Additive manufacturing ISO/ASTM 52900:2021 (En), *Additive Manufacturing—General Principles—Fundamentals and Vocabulary*. ISO: Geneva, Switzerland, 2021.
- [5] V. Shanmugam, O. Das, K. Babu, U. Marimuthu, A. Veerasimman, D. J. Johnson, R. E. Neisiany, M. S. Hedenqvist, S. Ramakrishna and F. Berto, Fatigue behaviour of FDM-3D printed polymers, polymeric composites and architected cellular materials. *International Journal of Fatigue*, 143, 106007, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106007>
- [6] D. Popescu, A. Zapciu, C. Amza, F. Baciuc, and R. Marinescu, FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. *Polymer Testing*, 69, 157–166, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.05.020>
- [7] T. J. Gordelier, P. R. Thies, L. Turner and L. Johannig, Optimising the FDM additive manufacturing process to achieve maximum tensile strength: A state-of-the-art review, *Rapid Prototype Journal*, 25(6), 953–971, 2019. <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2018-0183>
- [8] F. M. Mwema and E. T. Akinlabi, Basics of Fused Deposition Modelling (FDM). In: *Fused Deposition Modeling, Part of the book series: SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*, Springer, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48259-6_1
- [9] F. Bárník, M. Vaško, M. Sága, M. Handrik and A. Sapietová, Mechanical properties of structures produced by 3D printing from composite materials, *MATEC Web of Conferences*, 254, 01018, 2019.
- [10] P. Wang, B. Zou, S. Ding, L. Li and C. Huang, Effects of FDM-3D printing parameters on mechanical properties and microstructure of CF/PEEK and GF/PEEK, *Chinese Journal of Aeronautics*, 34, 236–246, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.05.040>
- [11] J. C. Camargo, Á.R. Machado, E. C. Almeida, and E. F. M. S. Silva, Mechanical properties of PLA-graphene filament for FDM 3D printing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103, 2423–2443, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03532-5>
- [12] J. Fernandes, A. M. Deus, L. Reis, M. F. Vaz and M. Leite, Study of the influence of 3D printing parameters on the mechanical properties of PLA, In *Proceedings of the International Conference on Progress in Additive Manufacturing*, Singapore, 14–17 May 2018.
- [13] D. Lee and G. Y. Wu, Parameters affecting the mechanical properties of three-dimensional (3D) printed carbon fiber-reinforced polylactide composites, *Polymers*, 12, 2456, 2020. <https://doi.org/10.3390/polym12112456>
- [14] R. Gautam and S. Idapalati, Compressive Properties of Additively Manufactured Functionally Graded Kagome Lattice Structure, *Metals*, 9(5), 517, 2019. <https://doi.org/10.3390/met9050517>
- [15] J. T. Cantrell, S. Rohde, D. Damiani, R. Gurnani, L. DiSandro, J. Anton, A. Young, A. Jerez, D. Steinbach, C. Kroese, and P. G. Ifju, Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts. *Rapid Prototyping Journal*, 23(4), 811-824, 2017. <https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2016-0042>
- [16] M. Al Rifaie, A. Lian and R. Srinivasan, Compression behavior of three-dimensional printed polymer lattice structures, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 233, 1574–1584, 2018. <https://doi.org/10.1177/1464420718770475>
- [17] G. J. Calise and A. Saigal, Anisotropy and failure in octahedral lattice structure parts fabricated using the fdm technology. In *Proceedings of the ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Tampa, FL, USA, 3–9 November 2017.
- [18] M. Helou, S. Vongbunpong, and S. Kara, Finite Element Analysis and Validation of Cellular Structures. *Procedia CIRP*, 50, 94–99, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.018>
- [19] J. Bauer, S. Hengsbach, I. Tesari, R. Schwaiger and O. Kraft, High-strength cellular ceramic composites with 3D microarchitecture, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(7), 2453–2458, 2014. <https://doi.org/10.1073/pnas.1315147111>
- [20] J. Fei, B. Lin, S. Yan, M. Ding, J. Xiao, J. Zhang, X. Zhang, C. Ji, and T. Sui, Chatter mitigation using moving damper, *Journal of Sound and Vibration*, 410, 49–63, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.08.033>
- [21] G. Stepan, A. K. Kiss, B. Ghalamchi, J. Sopanen and D. Bachrathy, Chatter avoidance in cutting highly flexible workpieces, *CIRP Annals*, 66(1), 377–380, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.054>
- [22] X. L. Yang, H. T. Wu, B. Chen, S. Z. Kang and S. L. Cheng, Dynamic modeling and decoupled control of a flexible Stewart platform for vibration isolation, *Journal of Sound and Vibration*, 439, 398–412, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.10.007>





Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynakları açısından hidroelektrik ve güneş enerjisinin bölgesel ve iller bazında incelenmesi

An evaluation of hydroelectric and solar energy as renewable energy sources across regions and provinces in Türkiye

Ömer Bilhan^{1,*} 

¹ Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Müh. Mim. Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 50300, Nevşehir, Türkiye

Öz

Günümüzde teknolojik gelişmelerin hız kazanması, nüfusun hızlı artışı, enerjiye olan ihtiyacın artmasına sebep olmaktadır. Her ülkenin kendi ekonomisini büyüterek, yaşam standartlarının yükseltilmesi için, sürekli, yeterli ve temiz enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun yanı sıra ülkeler arasındaki rekabet gücünün bir göstergesi de sahip olduğu enerji kaynaklarıdır. Son yıllarda, Türkiye kendi öz kaynaklarından yararlanarak enerji üretme konusunda çalışmalar ve yatırımlar yapan ülkeler arasındadır. Özellikle coğrafi konumunun verdiği avantajla güneş enerji santrallerinin kurulması hız kazanırken, barajlı veya barajsız kurulan hidroelektrik santraller ile su gücünden yararlanarak da elektrik enerjisi üretimi yapılmaktadır. Bu çalışmanın amacı, son yıllarda Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarından hidroelektrik ve güneş enerjisinin potansiyeli ve kullanımı açısından yapılan yatırımların sonuçlarını değerlendirerek, bu alanlardaki gelişimi incelemek ve karşılaştırmaktır. Ayrıca bu çalışmada kullanılan tüm veriler, Türkiye’de bölgesel ve iller bazında da ayrı ayrı incelenmiş ve sonuçlar sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Yenilenebilir enerji, Hidroelektrik santral, Güneş enerjisi, YGES, Kurulu güç

1 Giriş

Sanayi Devrimi, insanlık tarihinde, birçok açıdan toplumsal, ekonomik ve teknolojik değişimlere öncülük etmiştir. Bu dönem, 18. yüzyılın sonlarından 19. yüzyılın ortalarına kadar süren bir değişimi işaret ederken, paralelinde enerjiye olan ihtiyaçta bir artışa sebep olmuştur. Sanayi Devrimi’nin başlangıcında, geleneksel el işçiliği ve hayvan gücü gibi sınırlı enerji kaynaklarıyla üretilen malların yerini, buhar gücü ile çalışan makineler ve endüstriyel tesisler almıştır. Bu dönüşüm, toplumsal yapıyı ve üretim süreçlerini kökten değiştirirken, enerjiye olan talebi de büyük ölçüde artırmıştır. Özellikle tekstil, demir ve kömür gibi sektörlerdeki hızlı sanayileşme, enerji kaynaklarına olan bağımlılığı doruğa çıkarmış ve geleneksel yöntemlerle üretilen enerjinin yetersiz kaldığı bir noktaya gelinmiştir. Bu dönemde enerji talebindeki artış, özellikle kömür gibi fosil yakıtların yaygın olarak kullanılmasına yol

Abstract

Recently, the rapid advancement of technology and the fast-growing population have led to an increase in the demand for energy. Each country requires continuous, sufficient, and clean and green energy resources to grow its economy and improve living standards. Moreover, a country’s energy resources are also an indicator of its competitiveness on the global stage. In recent years, Türkiye has been among the countries that have been making efforts and investments in energy production by utilizing its own resources. Particularly, due to the geographical advantages, the establishment of solar power plants has accelerated, while hydroelectric power plants, both with and without dams, are being used to generate electricity from water power. The aim of this study is to evaluate the outcomes of the investments made in Turkey in recent years in terms of the potential and usage of renewable energy sources, specifically hydroelectric and solar energy, and to analyze and compare developments in these fields. Additionally, all the data used in this study have been analyzed separately on both regional and provincial levels in Türkiye, and the results are presented accordingly.

Keywords: Renewable energy, Hydroelectric power plant, Solar energy, FPV, Installed capacity

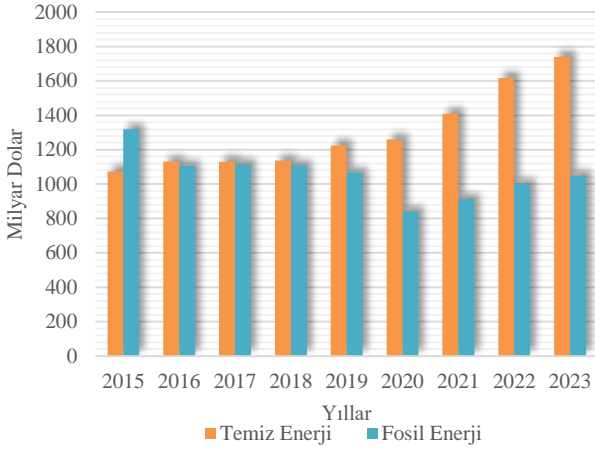
açmıştır. Fakat bu enerji kaynaklarının yoğun kullanımı, atmosferde sera gazlarının artmasına ve çevresel sorunlara neden olmuştur. Sanayi Devrimi’nin enerji ihtiyacındaki bu hızlı değişimi, günümüzde de enerji sektöründeki politika oluşturma ve sürdürülebilir enerji çözümleri arayışlarını etkilemektedir [1]. Bunun yanı sıra, hayatın her anında kullandığımız enerji, gelişmekte olan ülke düzeyini belirleyen en önemli faktörlerden biri haline gelmiştir. Ancak, petrol, doğalgaz, kömür gibi fosil kaynakların kontrolsüz nüfus artışı ve buna paralel olarak artan kentleşme ve endüstrileşme faaliyetleri nedeniyle hızla azaldığı gözlemlenmekte ve fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması çabaları ve sürdürülebilir enerji geleceğine artan ilgi, yenilenebilir enerji kaynaklarının daha geniş bir kullanımını teşvik etmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı’nın verilerine göre, küresel ölçekte, özellikle 2020 – 2023 yılları

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: omerbilhan@nevsehir.edu.tr (Ö. Bilhan)

Geliş / Received: 11.09.2024 Kabul / Accepted: 26.09.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1548541

arasında temiz enerji kaynaklarına yapılan yatırımlar Şekil 1 ile gösterildiği gibi büyük bir artış göstermiştir [2].



Şekil 1. Fosil ve temiz enerji kaynaklarına küresel düzeyde yapılan yatırımlar [2]

Temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik yatırımların artmasının ana sebepleri arasında çevresel etkilerin azaltılması amacıyla sürdürülebilir enerji çözümlerine yönelik küresel çabalar, fosil yakıtların fiyat dalgalanmaları, sınırlı kaynakların farkındalığı, politika destekleri, teşviklerle birlikte artan devlet düzeyindeki çabalar, teknolojik gelişmelerle birlikte temiz enerji maliyetlerinin düşmesi, enerji güvenliği hedefleri ve toplumsal bilinçlenmenin artması önemli rol oynamaktadır. Bu faktörler, temiz enerjiye yönelik küresel talebi artırarak ekonomik, çevresel ve sosyal açılardan sürdürülebilir enerji dönüşümünü teşvik etmektedir.

Dünya genelinde, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin en büyük payı, genellikle hidroelektrik enerji kaynaklarından gelmektedir. Başlangıçta sadece temel ihtiyaçlar için kullanılan su kaynakları, zaman içerisinde hareket halindeki suyun bir gücü olduğunun fark edilmesiyle, bu güçten yararlanarak çalışan değirmenler vb. cihazların geliştirilmesinin önünü açmıştır. Hidroelektrik enerji, su kaynaklarının kullanılmasına elektrik üretimini sağlayan bir yöntemdir. Barajlar gibi büyük regülasyon yapılarıyla, suyun potansiyel enerjisi, türbinler aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülerek elektrik şebekesine entegre edilir. Hidroelektrik enerji, uzun süredir kullanılan ve dünya genelinde yaygın olarak benimsenen bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Hidroelektrik enerjinin yanı sıra, rüzgar enerjisi ve güneş enerjisi gibi diğer yenilenebilir enerji kaynakları da hızla gelişmekte ve paylarını artırmaktadır. Rüzgar türbinleri rüzgar enerjisini elektrik enerjisine çevirirken, güneş panelleri güneş ışığından elektrik üretmektedir. Bu kaynaklar, teknolojik ilerlemeler ve artan çevresel bilinçle birlikte, küresel enerji portföyünde daha fazla önem kazanmaktadır. Ülkelerin yapmış oldukları yenilenebilir enerji kaynakları yatırımlarını çoğunlukla buldukları coğrafi konum ve iklim etkilemektedir. Bazı ülkeler hidroelektrik enerjiye daha fazla yatırım yaparken, diğerleri rüzgar, güneş veya jeotermal enerjiye daha fazla

yatırım yapabilmektedir. Örneğin, 2021 yılı itibarıyla Çin, en fazla su gücünden yararlanarak enerji üreten ülkedir. Çini sırasıyla Brezilya ve Venezuela takip etmektedir [3]. Çin'in, 2030 yılına kadar en büyük hidroelektrik enerji pazarı olmaya devam edeceği öngörülmektedir. 2021 yılında, IHA (International Hydropower Association) yayınladığı rapora göre, 2019 yılında hidroelektrik enerji kapasitesini artıran 50 ülke listelenirken, 2020 yılına gelindiğinde ülke sayısı 35'düşmüştür. Eklenen kapasite miktarı ise, 15.6 GW'dan 21 GW'a yükselmiştir. Liste incelendiğinde, bu alanda en yüksek yatırımı yapan ülkeler arasında, ilk sırada Çin (13.8 GW)'in yer aldığı, ikinci sırada ise, Türkiye (2.5 GW)'nin yer aldığı görülmektedir [4]. Bu sonuç Türkiye için, yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanma açısından olumlu bir gelişme örneğidir.

Hidroelektrik enerji potansiyelinin kullanılmasının yanı sıra günümüzde, ücretsiz ve hiçbir atık ürünü bulunmayan, dışarıdan bir yakıt gereksinimine ihtiyacı olmayan, gürültüsüz ve tükenmez bir kaynak olan güneş enerjisinin kullanımı da oldukça önemli hale gelmiştir. Güneş enerjisi kısaca güneşin çekirdeğinde meydana gelen füzyon reaksiyonu sonucunda açığa çıkan ışıma enerjisidir. Bu ışıma enerjisi atmosfer dışında yaklaşık 1370 W/m² olmasına rağmen yeryüzüne ulaştığında değeri yaklaşık 0 ile 1100 W/m² arasında değişmektedir. Özellikle 1970'lı yıllardaki malzeme alanındaki gelişmeler ve yarı iletken teknolojisinin gelişimiyle birlikte güneş ışımından yararlanarak elektrik enerjisinin üretilmesi hız kazanmaya başlamıştır. Teknolojik gelişmelerin hız kazanmasıyla birlikte güneş enerjisinden elektrik enerjisini üretmek için kullanılan hücre (modül / panel) maliyetleri azalarak günümüzde güneş enerjisi temiz enerji kaynaklarının başında yer almaya başlamıştır [5,6]. Güneş enerjisi, güneş ışınının toplanarak ısı ve elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanılan aktif sistemler olarak yada ısı veya ışık enerjisinin herhangi bir başka enerji türüne dönüşmeden güneş ışınının toplanmasıyla elde edilen pasif sistemler olarak kullanılabilir. Dünya haritasındaki enlemler ve boylamlara göre 45° kuzey - 45° güney enlemleri arasında kalan bölgelerde güneş enerjisinden daha fazla yararlanılabilmektedir. Ancak güneş enerji kurulum ve daha sonra işletme maliyetlerinin hala yüksek olmasından dolayı günümüzde güneş enerjisi yatırım faaliyetleri Avrupa, Amerika gibi ülkelerde daha fazla iken, güneşten daha fazla yararlanan Afrika, Güney Amerika gibi ülkelerde yatırımın daha az olduğu görülmektedir [7].

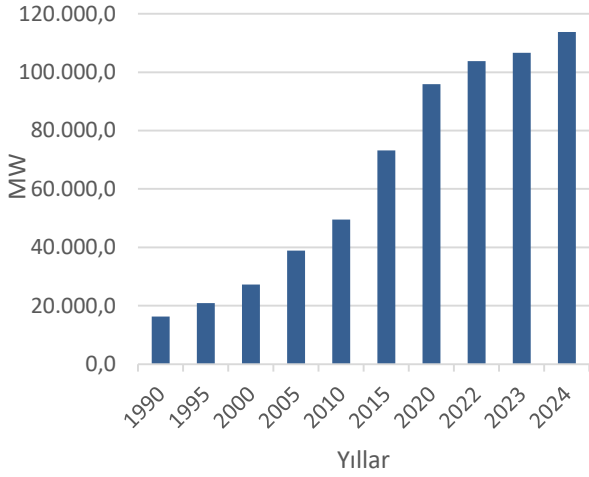
2 Yenilenebilir enerji kaynakları açısından Türkiye'de genel görünüm

Son yıllarda Türkiye'de ekonomik kalkınmayı artırmak, dışa bağımlılığı azaltmak amacıyla güneş enerji santralleri (GES), hidroelektrik enerji santralleri (HES), rüzgar enerji santralleri (RES), jeotermal enerjisi (JE), dalga enerjisi (DE) gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına olan araştırmalar ve yatırımlar artmıştır.

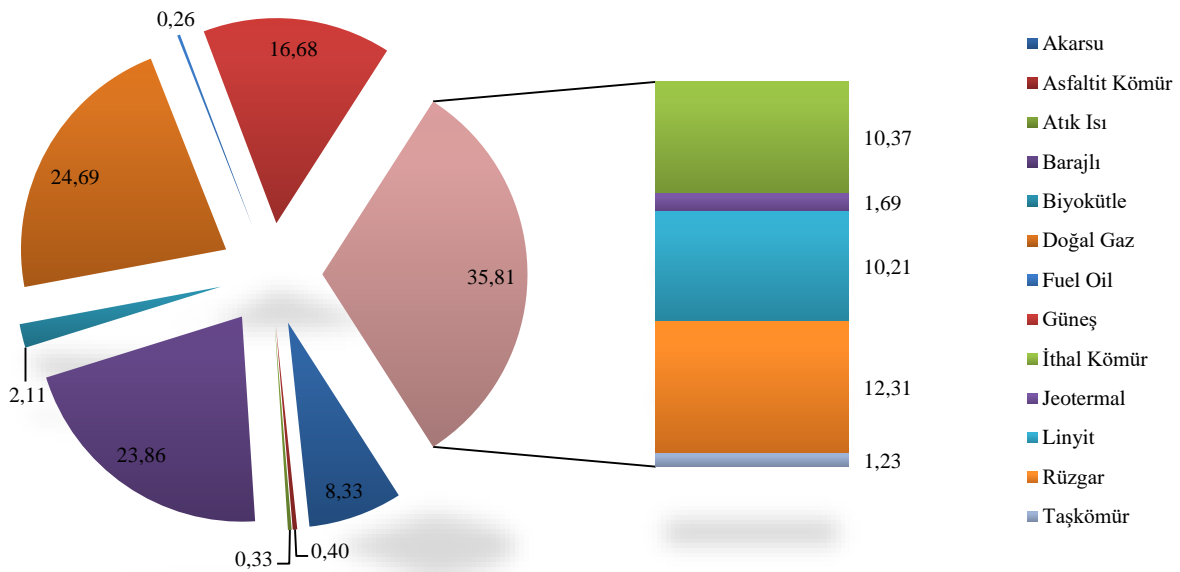
Şekil 2 ile Türkiye'nin 1990-2024 yılları arasındaki kurulu gücü, 5 yıllık periyotlarla ve son olarak 2024 yılına ait verilerle birlikte gösterilmektedir. Bu grafikteki değerler hesaplanırken, fosil yakıtlar (kömür, linyit, doğal gaz vb.), HES (Hidroelektrik Santral)'ler, rüzgâr, güneş, jeotermal ve

diğer kaynaklardan üretilen toplam enerji miktarları kullanılmıştır [8]. Şekil 2 incelendiğinde ülkemizdeki kurulu güçteki artış hızı, 1990 yıllardan itibaren hız kazandığı görülmektedir. Bununla birlikte enerji üretiminin artmasının yanı sıra enerji talebi de katlanarak artmaktadır.

Şekil 3’de Ağustos 2024 tarihi itibarıyla Türkiye’de mevcut kurulu güç dağılımı verilmektedir. Tüm kaynaklar değerlendirildiğinde, 2024 yılı Ocak ayı sonunda 107.041 MW elektrik enerjisi kurulu gücü bulunurken, 2024 yılı Ağustos ayı sonunda bu değer 113.750 MW’a ulaşmıştır. Şekil 3 incelendiğinde 2024 yılının Ağustos ayındaki elektrik kurulu gücümüzün yaklaşık olarak, %19.3’ünün kömürden, %21.9’ünün doğal gazdan, %28.5’sinin hidrolik enerjiden, %10.9’ünün rüzgârdan, %15.6’sının güneşten, %1.5’ünün jeotermal enerjiden ve %2.4’sinin diğer kaynaklardan oluştuğu görülmektedir [8].



Şekil 2. 1990-2024 Yılları Arasında Türkiye’de Mevcut Kurulu Gücün Değişimi [8]



Şekil 3. Türkiye’de elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı, Ağustos 2024 [8]

Bu çalışmada, Türkiye’nin enerji sektöründe büyük bir paya sahip olan hidroelektrik enerji santralleri ile güneş enerji santralleri ve potansiyelleri arasında güncel bir karşılaştırma yapılarak, hem bölgesel bazda hem de iller bazında, araştırılmıştır. Bu amaçla, Tarım Orman Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Türkiye İstatistik Kurumu Başkanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Enerji İşleri Genel Müdürlüğü ve bu çalışma ile ilgili uluslararası kurum ve kuruluşlara ait açık bilgi kaynaklarından veriler temin edilerek değerlendirilmiştir.

3 Türkiye’nin hidroelektrik enerji potansiyeli ve kurulu gücü

Akarsu, nehir gibi hareket halindeki suyun kendi hızına bağlı olarak bir gücü olduğu gibi, tasarlanan özel yapılarla sabit bir seviyeden daha düşük bir seviye kanallara yada borularla aktarılmasıyla da suyun gücünden yararlanılabilir. Hareket halindeki suyun önüne yerleştirilen ve türbin adı verilen yapılar dönme hareketi yaparak mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Bu sayede suyun hareket hızından yararlanarak elektrik enerjisi üretilmiş olur. Bu üretimin yapıldığı tesislere hidroelektrik santral (HES) denir. Günümüzde, bu işlem belirli bir hız ile hareket halinde olan su kaynaklarının üzerine yerleştirilen regülasyon yapılarıyla hidroelektrik santraller (HES) kullanılarak gerçekleştirilmekte ve evlerimize kadar bu elektrik dağıtılmaktadır [9].

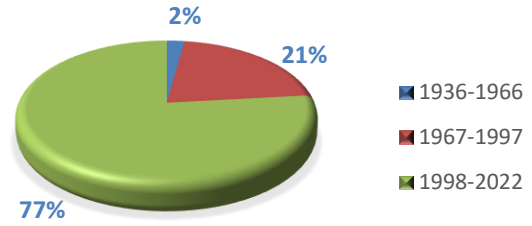
Barajlı veya barajsız HES’ler karbon salınımı yapmamaları, çevre kirliliğine sebep olmamaları, kırsal bölgelerde iş imkanı oluşturmaları, bakımlarının kolay ve ucuz, işletme sürelerinin uzun olması sebebiyle tercih edilen bir enerji kaynağıdır [10].

Hidroelektrik enerji santralleri temiz enerji kapsamında değerlendirilebilirse de, kontrolsüz kurulumlarıyla su kaynaklarına ve kalitesine zarar verilebilmesi, tarım alanlarının zarar görebilmesi, ekosisteme, bitkilere, çeşitli canlı türlerinin doğal ortamlarına zarar verilebilmesi gibi dezavantajları da bulunmaktadır [11]. Mevcut durumda, özellikle ülkemizin de yer aldığı gelişmekte olan ülkelerde, planlama yapılırken iklim değişikliği senaryoları ve arazi kullanım değişiklikleri göz ardı edilebilmektedir. Bu konuda gelişmiş ülkeleri incelediğimizde, iklim değişikliği de dikkate alınarak birçok baraj için renovasyon çalışmaları yapıldığı, hatta yapı ömrünü tamamladığı belirlenen barajlar için yıkım kararları alındığını görmekteyiz. Temiz enerji yatırımlarını artırırken, barajların sınırlı bir ömre sahip olduğu ve sürdürülebilir uzun vadeli bir enerji üretim stratejisi olmadıklarını dikkate almak gerekmektedir. Barajlarda meydana gelen arızaların ve işletme çalışmalarında meydana gelen sorunların ağırlıklı olarak, akarsular tarafından taşınan katı madde veya bir başka ifadeyle sediment birikiminden ve baraj yapım malzemelerindeki yaşlanmadan kaynaklandığı söylenebilir. Barajlar kullanım süreleri arttıkça arızaya daha fazla eğilim gösterirler. Amerika Birleşik Devletleri'nin Georgia eyaletinde 1994 yılında tek bir tropik fırtınadan kaynaklanan yoğun yağışlar, 230'dan fazla barajın arızalanmasına neden olmuştur [12]. Yine 2016 yılında Kaliforniya eyaletinde, yoğun yağışlar sonucu Oroville Barajı dolusavağında hasar oluşmuş ve bölgede 190.000 kişinin evlerinden tahliye edilmesine neden olmuştur. Özellikle gelişmiş ülkelerde, inşa edilen barajların birçoğunun ömürlerini tamamlamış olması, bu barajların onarım maliyetlerinin, yıkım maliyetlerinin 3 katı olması, bu barajlar için yıkım kararları alınması eğilimini arttırdığı görülmektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde yılda 60'a yakın baraj için yıkım kararı alınmaktadır [13].

DSİ Genel Müdürlüğü'nün yayınladığı verilere göre, Türkiye'de 1936-2022 yılları arasında inşa edilen toplam 1018 barajın, 22 tanesi 1936-1966 yılları arasında inşa edildiği, 214 adet barajın ise 1967-1997 yılları arasında inşa edildiği görülmektedir (Şekil 4) [14]. Bu oranlar incelendiğinde, her ne kadar mevcut barajların %77'si nispeten genç barajlar olarak nitelendirilebilirse de 50 yıl ve üzeri bir tarihte inşa edilen baraj sayısında, Türkiye'de sürdürülebilir uzun vadeli bir enerji üretim stratejisi, onarım maliyetleri ve yıkım maliyetleri de gelecek yıllarda dikkate alınması gereken önemli bir husustur.

Türkiye'de DSİ verilerine göre 2022 yılı için sektörel su kullanımları; Sulamada 44 Milyar m³ (%77) evsel kullanım, sanayi ve diğer alanlarda 13 Milyar m³ (%23) olmak üzere, toplam su kullanımları 57 Milyar m³'tür. Diğer su kullanım verileri için TÜİK verilerinden hareketle Belediyeler, köyler, imalat sanayi işyerleri, termik santraller, Organize Sanayi Bölgeleri (OSB) ve maden işletmeleri tarafından 2020 yılında su kaynaklarından toplam 18.2 milyar m³ su kullanılırken, 2022 yılında ise toplam 19.2 milyar m³ su kullanıldığı belirlenmiştir. 2022 yılında kullanılan suyun 56.8%'i denizden; 22.1%'i yeraltı ve 21,1%'i yüzey suları olmak üzere toplam 43.2%'si tatlı su kaynaklarından temin

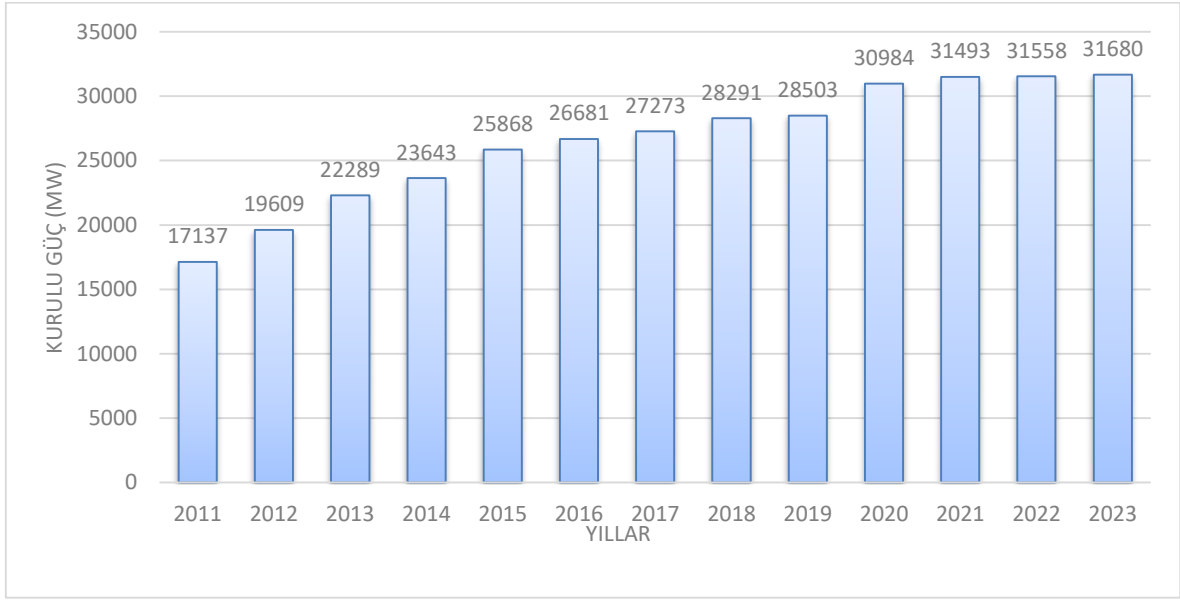
edildiği belirtilmiştir. Türkiye'de kişi başına düşen kullanılabilir yıllık su miktarı 2000 yılında 1652 m³ iken bu değer, 2009 yılına bakıldığında 1544 m³, 2021 yılında 1323 m³ ve 2022 yılı için 1322 m³ olarak belirlenmiştir [15,16]. Türkiye'de kişi başına düşen yıllık kullanılabilir su miktarı son yıllarda 1500 m³ altına düştüğünden, Türkiye "Su fakiri Ülke" kategorisinde aday ülke durumundadır [17].



Şekil 4. Türkiye'de baraj sayılarının İnşaa edildiği tarihlere göre dağılımı

DSİ verilerine göre, 2023 yılı itibari ile Türkiye'de işletmede olan hidroelektrik enerji santrallerinin toplam kurulu gücü 31.680 MW'a ulaşmıştır. Şekil 5 ile Türkiye hidrolik enerjisine dayalı kurulu gücü 2011-2023 yılları arasında gösterilmektedir [18].

Şekil 6'da 2021 yılına ait Türkiye hidroelektrik santralleri haritası gösterilmektedir [19]. Haritada, güçleri 30-100, 100-200, 200-500, 500-800, 1000-2000, ve 2000-3000 MW olan HES'ler gösterilmektedir. HES'ler, kurulu güçlerine (mikro ölçekli, mini ölçekli, küçük ölçekli ve büyük ölçekli), suyun iletim şekline veya suyun biriktirilme durumlarına göre sınıflandırılmaktadır. Mikro ölçekli HES'ler, genelde şebekeden uzak yerlerde enerjinin sağlanması amacıyla kurulan küçük yerleşim yeri veya balık çiftlikleri için enerji sağlayabilecek yapılardır. Mini ölçekli HES'ler, kurulu gücü 101-1000kW arasında olan akarsu kenarlarında kurulan yine küçük yerleşim yerleri, çiftlikler için tercih edilen yapılardır. Küçük ölçekli HES'ler de kurulu güç 10-50 MW arasında olan, şebekeye bağlanabilecekleri gibi, küçük bir yerleşim bölgesinin (kasaba gibi) veya büyük bir fabrikanın enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla da kurulan yapılardır. Büyük ölçekli HES'lerin ise kurulu gücü 50 MW'ın üzerinde olan yapılardır (50MW güç ile yaklaşık 10000 hanenin elektrik ihtiyacının karşılanabileceği söylenebilir). Şekil 7'de DSİ Genel Müdürlüğü'nün en son yayınladığı resmi verilere göre 2022 yılı sonu itibariyle, bölgesel olarak il bazında kurulu HES güçleri gösterilmektedir [14].



Şekil 5. 2011-2023 Türkiye hidroelektrik enerji kurulu gücün yıllara göre değişimi

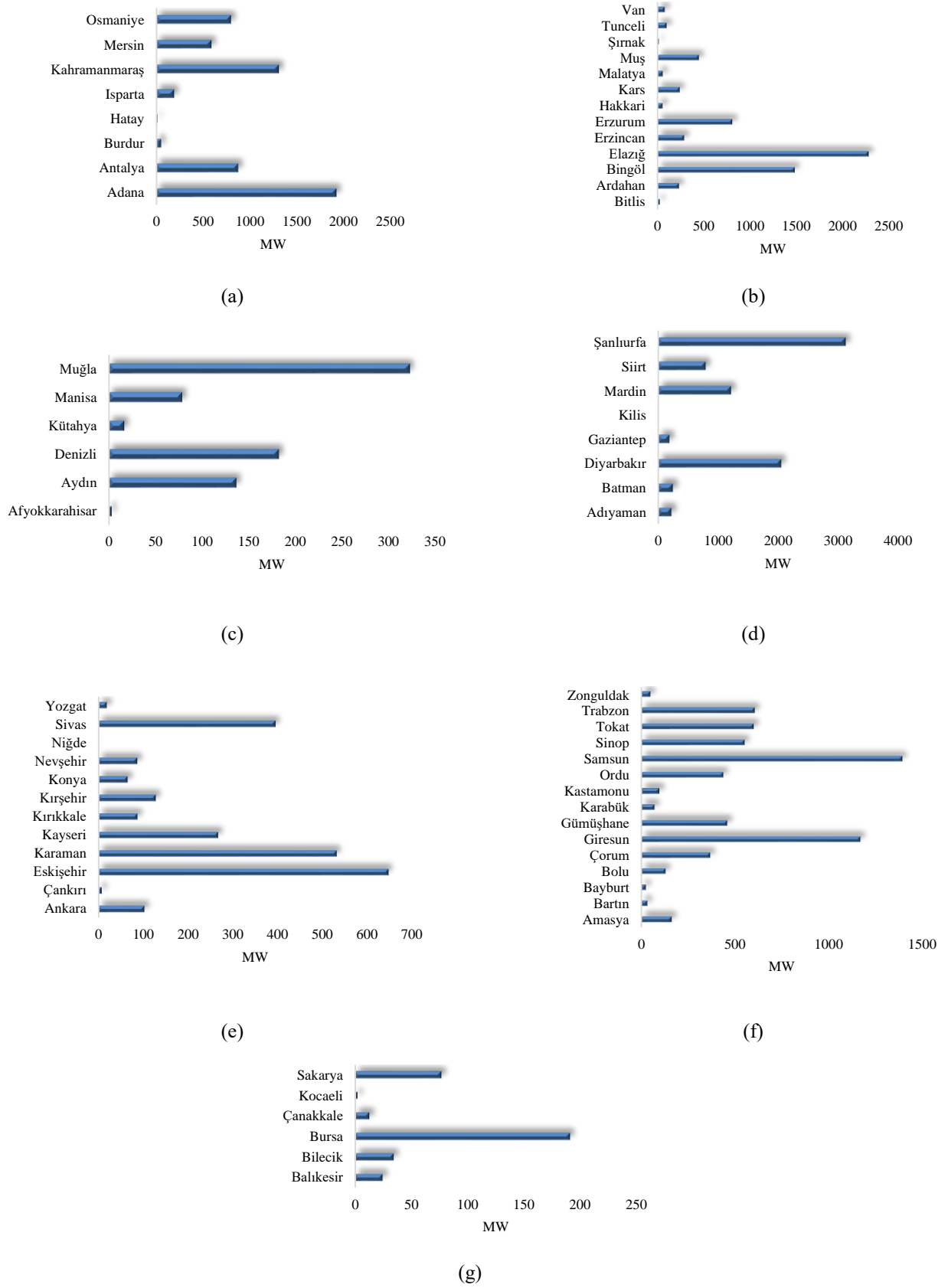


Şekil 6. Türkiye hidroelektrik santralleri haritası, 2021 [19]

Şekil 7 incelendiğinde bölgesel bazda, en yüksek HES kurulu gücüne sahip 3 bölge sırasıyla, Güney Doğu Anadolu Bölgesi, Doğu Anadolu Bölgesi ve Karadeniz Bölgesi olurken, son sıralarda ise Marmara Bölgesi ve Ege Bölgesi yer almaktadır. Şekil 7 il bazında değerlendirilirse, sırasıyla Şanlıurfa, Elazığ, Diyarbakır, Adana ve Bingöl illeri Türkiye’de en yüksek HES kurulu gücüne sahip iller olarak ön plana çıkmaktadır.

Tablo 1’de Türkiye’de mevcut, faaliyette olan en büyük hidroelektrik santraller buldukları il ve kurulu güçleri esas alınarak listelenmiştir .

Su yapıları ve enerji üretim tesisleri oldukça riskli yapılardır. HES’lerin kurulumu sırasında ormanlık alanlar zarar görebilmekte (yol açılması için ağaçların kesilmesi, gerekli çakıl kumun akarsu yataklarından çekilmesi vs.), hafriyatların vadilere dökülmesi ekosisteme, su kaynaklarına, su kalitesine zarar verebilmektedir. Bunun yanı sıra baraj yapımı sırasında çıkabilecek sorunlar birçok alanda farklı etkilere sebep olabilmektedir. Bu nedenle HES planlamalarında iklim değişimi senaryoları, ve detaylı ÇED raporlarıyla tüm ekolojik şartların kontrol edilmesi, inşaat ve işletme şartlarının uzun vadeli olarak değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir.



Şekil 7. Türkiye’de bölgesel ve il bazında hidroelektrik santrallerin kurulu güç oranları (a) Akdeniz Bölgesi (b) Doğu Anadolu Bölgesi (c) Ege Bölgesi (d) Güneydoğu Anadolu Bölgesi (e) İç Anadolu Bölgesi (f) Karadeniz Bölgesi (g)Marmara Bölgesi

Tablo 1. Türkiye’deki büyük ölçekli kurulu güce sahip 10 hidroelektrik santrali [20]

Santral Adı	Kurulu Güç (MW)	Bulunduğu İl
Atatürk Barajı ve HES	2.405	Şanlıurfa
Karakaya Barajı HES	1.800	Diyarbakır
Keban Barajı HES	1.330	Elazığ
İlisu Barajı HES	1.209	Mardin
Altınkaya Barajı HES	703	Samsun
Birecik Barajı ve HES	672	Şanlıurfa
Deriner Barajı ve HES	670	Artvin
Yukarı Kaleköy Barajı ve HES	627	Bingöl
Beyhan Barajı ve HES	582	Elazığ
Yusufeli Barajı ve HES	540	Artvin

4 Türkiye’nin güneş enerji potansiyeli ve kurulu gücü

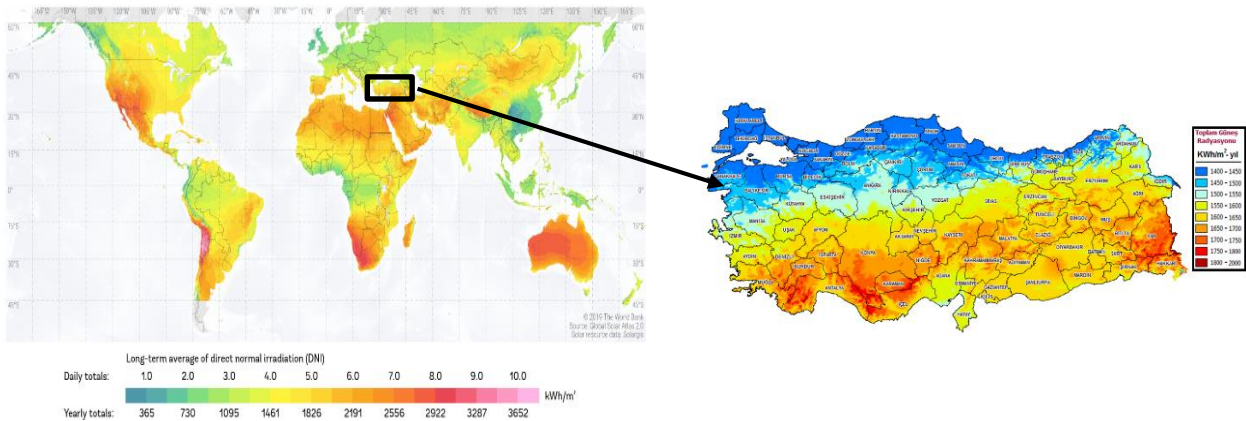
Yenilenebilir, temiz ve dünyanın her noktasında ulaşılabilir olması nedeniyle güneş enerjisi oldukça önemli bir enerji kaynağıdır. Ancak, Dünya’nın şekli, kendi etrafında dönmesi veya mevsimsel farklılıklar nedeniyle üretilen enerji bölgesel olarak değişmektedir. Özellikle tropikal kuşak, yani 23.5° güney paraleli ile 23.5° kuzey paraleli arasında olan bölgelerde daha yüksek güneş enerjisi seviyelerine ulaşılabilir. Bu nedenle, Şekil 8 ile verilen Dünya Güneş Atlası incelendiğinde, 36° ile 42° kuzey enlemleri ve 26° ile 45° doğu boylamları arasında yer alan Türkiye’nin, coğrafi konumu bakımından avantajlı olduğu söylenebilir [21].

Şekil 8’de verilen Türkiye güneşlenme haritasında [22], güneş ışınlarından en fazla yararlanan şehirler koyu turuncu renkten sarı rengine doğru, güneş ışınlarından daha az yararlanan şehirler ise mavi yeşil renklerle gösterilmektedir. Şekil 8 incelendiğinde Türkiye’nin büyük bir kısmının güneş enerjisinin üretilmesi açısından oldukça avantajlı bir konuma sahip olduğu görülmektedir [23, 24]. Bu haritaya göre, Türkiye’nin en çok güneş alan bölgesin Güneydoğu Anadolu Bölgesi olduğu söylenebilir. Bu bölgeyi sırasıyla Akdeniz Bölgesi, Doğu Anadolu Bölgesi, İç Anadolu Bölgesi, Ege

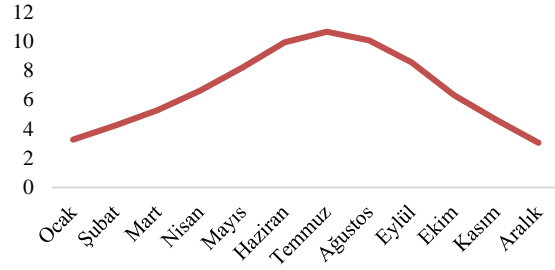
Bölgesi, Marmara Bölgesi ve Karadeniz Bölgesi takip etmektedir.

Şekil 9 (a) ile verilen Türkiye’nin 1991-2020 yılları arasındaki ortalama aylık güneşlenme süresi (saat/gün) incelendiğinde [25], Türkiye’nin en yüksek aylık ortalama güneşlenme süresinin Temmuz ayında 10,66 saat/gün olduğu, en az aylık ortalama güneşlenme süresinin ise 3,05 saat/gün ile Aralık ayında ulaşıldığı görülür. Şekil 9 (b) Türkiye’nin 1991-2020 yılları arasındaki ortalama yıllık güneşlenme süresi (saat/gün) incelendiğinde ise yıllık ortalama güneşlenme süresinin 6,28-7,19 saat/gün arasında değiştiği, yıllar arasında büyük bir fark oluşmadığı görülebilir [25]. Bu değerler ışığında özellikle güneşlenme süresinin daha az olduğu aylarda elektrik enerjisinin üretimi için diğer alternatif kaynaklardan yararlanmanın, güneşlenme süresinin yüksek olduğu aylarda daha fazla güneş enerji kaynaklarından faydalanmanın daha avantajlı bir enerji yönetimi stratejisi olacağı söylenebilir

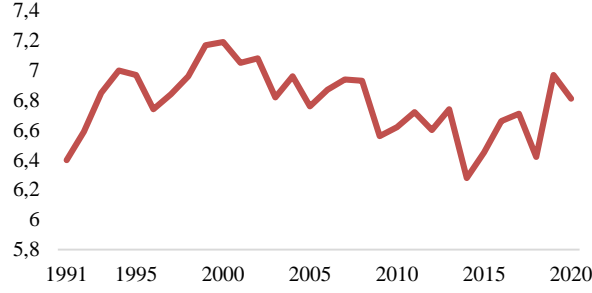
Güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilen güneş hücreleri ise bir yada iki tabakalı yarı iletkenlerden oluşmaktadır. Bu tabaka üzerine düşen ışın, hücrenin uçlarında elektrik enerjisi üretilmesi sağlar. Işın yoğunluğunun artması ile de üretilen elektrik şiddeti artmaktadır. Tek bir güneş hücresinden elde edilebilecek maksimum gerilim değeri yaklaşık olarak 0,5-0,7 V arasındadır [26]. Bu nedenle daha yüksek gerilim değerlerine ulaşabilmek için güneş hücrelerinin seri ve paralel bağlanmalarıyla önce güneş panelleri, daha sonra ise güneş panellerinin daha önceden belirlenen bir bölgede ve daha önceden belirlenen bir güç değerine ulaşabilmesi için bu panellerin yine seri ve paralel bağlanmalarıyla güneş enerjisi santralleri (GES) oluşturulur. Ancak, GES’lerin performanslarını meteorolojik koşullar, toz ve parçacık kirliliği, güneş hücrelerinin ve modüllerinin dönüşüm verimliliği, eğim açıları veya sıcaklıkları gibi koşullar etkilemektedir. Bu nedenle GES’ler de belirli periyotlar ile temizlik yapılmaktadır.



Şekil 8. Dünya ve Türkiye güneş atlası [22]

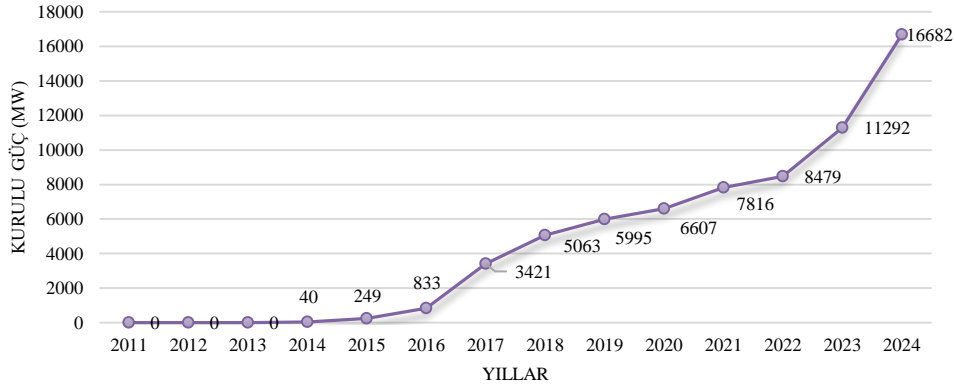


(a)



(b)

Şekil 9. 1991-2020 yılları arasında (a) Türkiye Ortalama Aylık Güneşlenme Süresi (saat/gün), (b) Türkiye Ortalama Yıllık Güneşlenme Süresi (saat/gün)



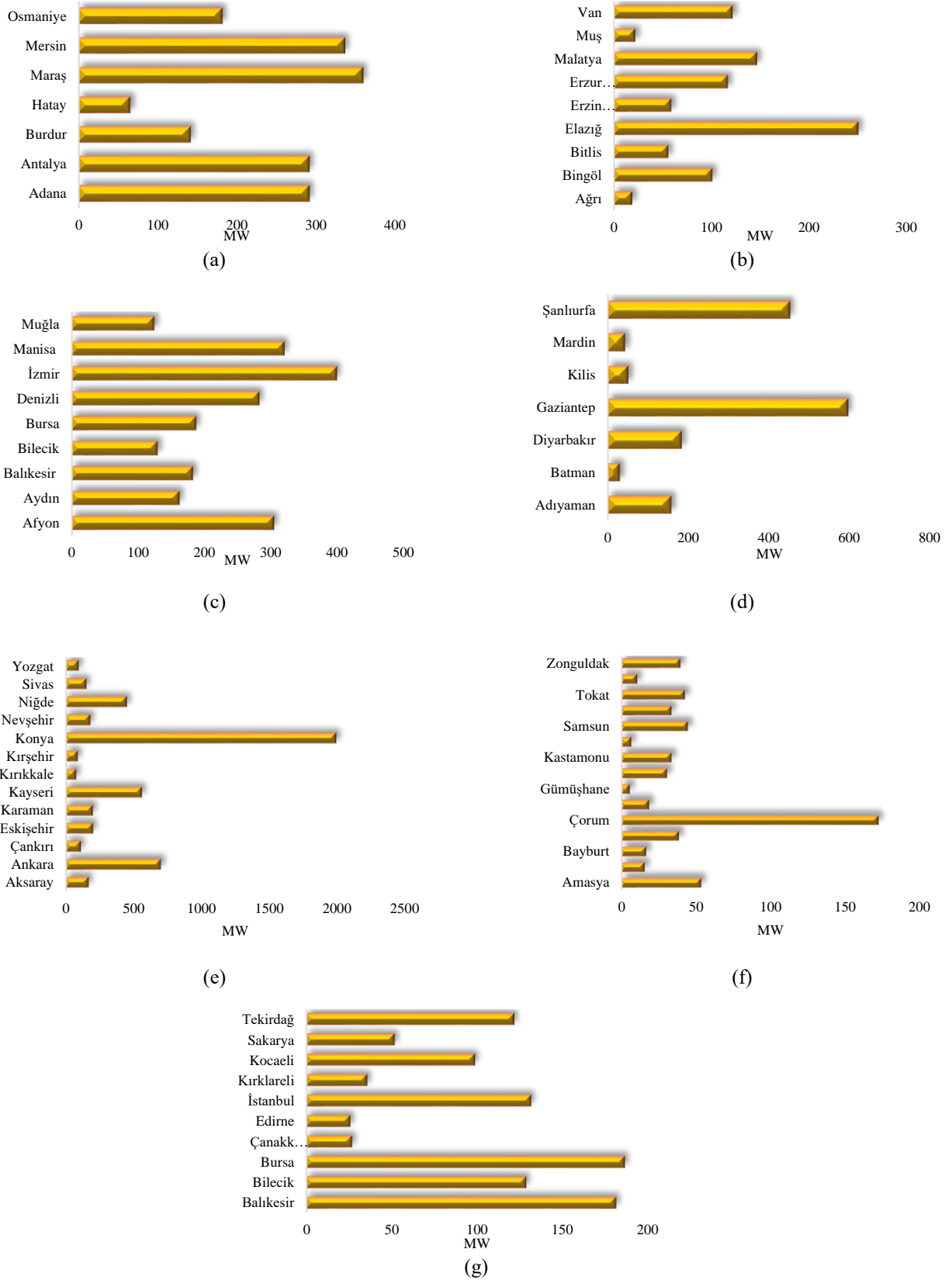
Şekil 10. Türkiye güneş enerjisi kurulu gücünün yıllara göre değişimi

Ağustos 2024 tarihli Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) verileri incelendiğinde Türkiye’de toplam 29001 adet güneş enerjisi santrali (GES) bulunmaktadır [8]. 2014 yılında 40MW olan güneş enerjisine dayalı elektrik kurulu gücü, Ağustos 2024 sonu itibarıyla 16.682 MW’a ulaşmıştır. 2011-2024 yılları arasındaki değişim Şekil 10 ile gösterilmektedir. Şekil 10 incelendiğinde 2014 yılından itibaren oldukça hızlı bir ilerleme olduğu gözlemlenmektedir [27]

GES’lerin kurulması sırasında sadece güneşin ışınım değerleri yeterli olmamaktadır. Özellikle sulak alanlarda, yerleşim yerlerine yakın yerlerde, koruma alanı olan ve yasak bölgelere GES kurulamamaktadır. Ayrıca GES’lerin kurulması için yer tayini yapılırken jeolojik olarak yer çalışmaları da yapılmaktadır. 2022 T.C. Enerji ve Tabii Kaynakları Bakanlığı verilerine göre Türkiye’nin 78 ilinde

güneş enerjisinden yararlanarak elektrik üretilebilmektedir. Şekil 11’de Türkiye’de GES kurulu güçleri, bölgesel bazda ve il bazında değerlendirilmiştir [20].

Şekil 11’de il bazında her bölgede yer alan GES’ler incelendiğinde en yüksek üretimin İç Anadolu Bölgesi’nde olduğu, en az üretimin ise Karadeniz bölgesinde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca İç Anadolu Bölgesinde Konya ili, Akdeniz Bölgesinde Kahramanmaraş ili, Doğu Anadolu Bölgesinde Elazığ ili, Ege Bölgesinde İzmir ili, Güneydoğu Anadolu Bölgesinde Şanlıurfa ili, Karadeniz Bölgesinde Çorum ili ve Marmara Bölgesinde Bursa ili GES kurulu güç değerleri bakımından ön plana çıktığı görülmektedir. Iğdır, Rize, Ardahan, Yalova ve Tunceli illerinde kurulu güç değerleri ise 5MW’ın altındadır. Tablo 2’de Türkiye’nin en büyük kurulu gücüne sahip GES’leri sıralanmıştır.



Şekil 11. Türkiye’de bölgesel ve il bazında Güneş enerjisi santrallerinin kurulu güç oranları (a) Akdeniz Bölgesi (b) Doğu Anadolu Bölgesi (c) Ege Bölgesi (d) Güneydoğu Anadolu Bölgesi (e) İç Anadolu Bölgesi (f) Karadeniz Bölgesi (g) Marmara Bölgesi

Tablo 2. Türkiye’deki en yüksek güneş enerjisi gücüne sahip GES’ler [20]

Santral Adı	Kurulu Güç (MW)
Karapınar GES- Konya	1000
Naturel & Esenboğa GES - Ankara	118
Bor 2 GES - Niğde	100
Bor 3 GES - Niğde	100
Aşağı Kaleköy Barajı Hibrit GES - Bingöl	76
Kayseri OSB GES - Kayseri	50
Akyel 1 ve 2 RES Hibrit - Karaman	50
Uşak Rüzgar Santrali Hibrit GES - Uşak	45
Van Arısu GES - Van	45
Özkoyuncu Madencilik GES - Balıkesir	40

5 Yüzer güneş enerjisi santralleri (YGES)

Son yıllarda, özellikle gelişmiş ülkelerde, gelecekte güvenilir, uygun fiyatlı ve sürdürülebilir enerji kaynaklarını sağlamak için mevcut güç üretim teknolojilerini, düşük maliyetli PV ile tamamlamanın yolları konusunda araştırmalar yapılmaktadır [28], Yüzer güneş PV (Floating Solar PV Systems-FPV) sistemleri, doğrudan göller, göletler veya rezervuarlar gibi su kütlelerine yerleştirildiği, PV’nin ortaya çıkan ve giderek daha uygulanabilir bir örneğidir. Günümüzde özellikle su kaynaklarını enerji üretiminde yoğun olarak kullanan gelişmiş ülkelerde, arazi kullanım baskıları, iklim hedefleri ve enerji güvenliği ile ilişkili ek faydalar nedeniyle YGES’ne olan ilgi artmaktadır [29].

Dünyada YGES sistemlerinin, 2007’de 1 MW’ın altında olan küresel kurulu güç kapasitenin 2018’de 1.314 MW’a ve 2022’de kadar yaklaşık 13.000 MW’a ulaşması ile bu konudaki çabaların ve yatırımların gelecek yıllarda daha hızlı bir şekilde artacağını ortaya koymaktadır [30]. Bu mevcut kapasitenin büyük çoğunluğu ve öngörülen YGES pazar büyümesi, hidroelektrik enerji üretiminin yaygın olduğu yüksek arazi maliyetleri, arazi bulunabilirliğindeki kısıtlamaların görüldüğü Asya kıtasında bulunmaktadır [31].

Yüzer güneş enerjisi santralleri (YGES) olarak adlandırılan ve su yüzeyine monte edilen hareketli platformlar üzerine yerleştirilen güneş enerjisi panellerinden oluşan sistemler sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için önemli bir rol oynamaktadır. Güneş enerjisinden daha etkin bir şekilde yararlanmak amacıyla geliştirilen bu teknoloji özellikle karasal alanda sıkıntı yaşanan ve su kaynaklarına yakın olan yerleşim yerlerinde enerji kapasitesini arttırmak için bir fırsat oluşturmaktadır. Bu sistemlerin özellikle hidroelektrik barajlar gibi mevcut enerji şebekeleri ile birlikte kullanılması karasal GES’lere göre daha farklı avantajlar sunabilmektedir. Su yüzeyinde kurulan bu sistemler ile arazi kullanımı optimize edilirken, suyun buharlaşmasının azaltılması gibi ek çevresel faydalar sağlayabilmektedir.

Yüzer güneş enerjisi santrallerinin ilk örneği 2007 yılında Japonya’da uygulanmış olup, günümüzde özellikle Asya kıtasında yer alan Çin, Japonya, Kore ile birlikte Avrupa’da da kullanımı yaygınlaşmıştır [31].

Türkiye’de ilk YGES örneği 2017 yılında Büyükçekmece Gölü üzerinde hayata geçirilmiş olup 240 kW güce sahiptir [31]. Şenli tarafından 2023 yılında yapılan çalışmanın sonuçları incelendiğinde, Türkiye’nin en büyük

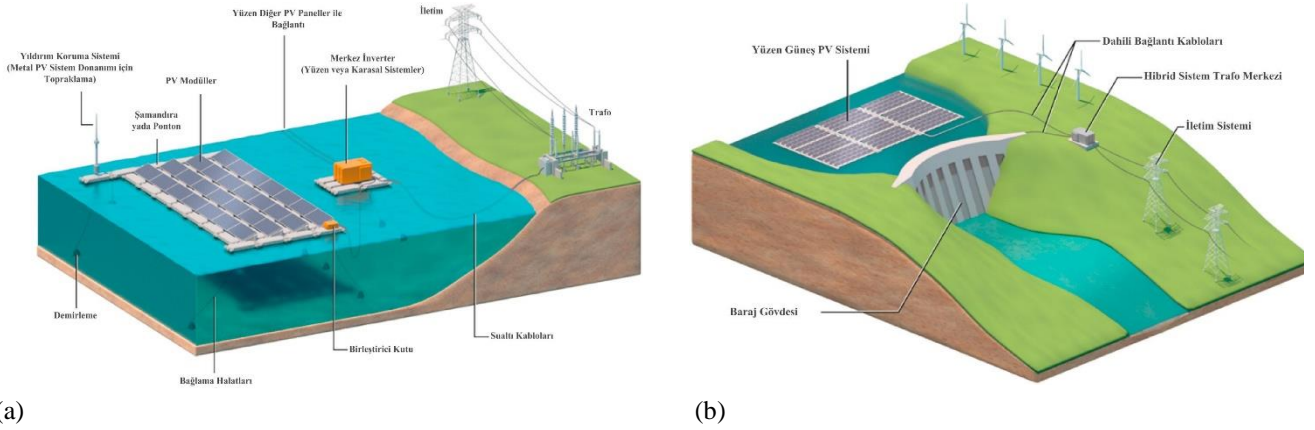
yüzey alanına sahip 5 barajının mevcut HES ve potansiyel YGES kapasiteleri belirlenmiştir. Şenli araştırmasında bu 5 büyük barajın rezervuarında %0,1’lik alana kurulabilecek YGES sistemlerinin yaklaşık 414,47 GWh/yıl daha fazla enerji üretimine katkı sağlayabileceğini belirtmiştir [31]. Baraj ve göletlerin rezervuar yüzey alanlarının fotovoltaik panellerle kaplanması suretiyle oluşturulan Yüzer GES’ler, bir yandan temiz ve yenilenebilir elektrik enerjisi üretirken bir yandan da buharlaşmadan kaynaklanan su kayıplarının azaltılmasını sağlamaktadır. Karasal GES’lere göre %10 daha verimli çalışan Yüzer GES’ler; atıl durumdaki rezervuar yüzey alanlarının değerlendirilerek ekonomiye kazandırılmasını sağlamakla birlikte, içme suyu maksatlı barajlar haricinde tüm baraj rezervuarlarında kurulabilmektedir [32]. Türkiye’nin elektrik ihtiyacının %25’ni tek başına karşılayabilen Keban Barajı, halen ülkemizin en büyük kapasiteli üçüncü hidroelektrik santrali konumunda bulunuyor. Yaklaşık 50 yıllık bir ömre sahip olan barajın rezervuarına, DSİ Genel müdürlüğü tarafından, Kuzova Yüzer GES AR-GE Projesi kapsamında, hidroelektrik enerjinin yanında güneş enerjisi üretimine de katkı sağlayacak yaklaşık 1 MW kurulu güce sahip “Yüzer GES”in kurulumu tamamlanmıştır. Bu proje; Yüzer GES tesisinde üretilen enerjinin tarımsal üretimde kullanılması ve AR-GE faaliyetleri içermesi bakımından ön plana çıkmaktadır (Şekil 12). DSİ Elazığ 9. Bölge Müdürlüğü tarafından Fatmalı köyü Beşevler mezarası mevkiisindeki Keban Baraj Gölü üzerine yapımı tamamlanan yüzer GES enerjisi santralinde yıllık 1 milyon 806 bin kWh enerji elde edilmesi hedeflenmektedir.



Şekil 12. Keban Baraj Gölü Kuzova yüzer GES AR-GE projesi [32]

5.1 Bağımsız YGES sistemleri

Bağımsız YGES (FPV) sistemleri, bağımsız olarak çalıştırılan ve diğer jeneratörlerle hibrit olarak çalıştırılmayan veya bunlara bağlı olmayan YGES sistemleridir. Şekil 13a, büyük ölçekli bir YGES sisteminin örnek bir yapılandırmasını ve temel bileşenlerini göstermektedir. Bugüne kadar, bağımsız YGES sistemleri çoğunlukla yapay su kütleleri (yani, artırılmış atık su havuzları, rezervuarlar, göletler vb.) üzerine kurulmuştur. PV modülleri genellikle kara tabanlı sistemlerde kullanılanlarla aynıdır; ancak YGES sistemleri, kara tabanlı sistemler için kullanılan sabit raflar yerine, plastik ve paslanmaz (veya galvanizli) çelikten yapılmış yüzen platformlara monte edilir. Daha sonra bu modüler platformların bir serisi, işletim ve bakım için erişime izin



Şekil 13. a) Tipik bir bağımsız büyük ölçekli YGES sisteminin şeması ve temel bileşenleri. b) Hibrit YGES-hidroelektrik sisteminin şeması ve temel bileşenleri [29]

veren belirlenmiş yollarla birbirine bağlanır. Platformlar, kıyıya, su kütlelerinin tabanına veya yüzen çapalara demirlenmiş bağlama hatlarına bağlanır. Sistem, genellikle kıyıda bulunan ana elektrik ekipmanına ve şebekeye su altı kabloları aracılığıyla bağlanır. Daha büyük kapasiteli YGES kurulumları, trafa merkezine daha büyük miktarda enerji iletilmesine olanak sağlamak için alt PV dizilerine ayrılmak zorunda kalabilir [29].

5.2 Hibrit YGES-hidroelektrik sistemleri

Hibrit sistemlerde kullanılan YGES sistemleri, bağımsız sistemlerle aynıdır; ancak, diğer üretim sistemleriyle birleştirilirler (Şekil 13b).

Her biri farklı maliyet ve performans değerleri sunan üç olası hibritleşme konfigürasyonu önerilmektedir. Bu konfigürasyonlardan birincisinde, ortak yerleşimli hibrit sistemler de maliyetten tasarrufu elde etmek için birlikte konumlandırılan iki veya daha fazla teknoloji kullanılırken; üretim ayrı ayrı optimize edilir. İkinci olarak, sanal hibrit sistemler (performans iyileştirmeleri) de iki veya daha fazla teknoloji ayrı ayrı konumlandırılır ve operasyonlar ikili anlaşmalar ve bazı eş-optimize edilmiş operasyonlar aracılığıyla birbirine bağlanır. Üçüncü olarak, tam hibrit sistemlere ise hem maliyet hem de performans iyileştirmeleri, eş-optimize edilmiş planlama ve operasyon yoluyla elde edilir. Bunlar genellikle en az bir dağıtılabilir teknoloji ile bir veya daha fazla değişken yenilenebilir enerji teknolojisinin eşleştirilmesinden oluşur ve eşleştirildiğinde operasyonel faydalar sunar [29].

6 Sonuçlar

Son yıllarda, Türkiye'nin enerji politikalarında yaşanan dönüşüm, yenilenebilir enerji kaynaklarının gelişimine yönelik önemli adımlar atılmasını sağlamıştır. Güneş enerjisi ve hidroelektrik enerji kapasitesindeki artış, bu sürecin en dikkat çekici unsurlarından biri olmuştur.

2013 yılında neredeyse yok denecek kadar az olan kurulu güneş enerjisi kapasitesi, 2023 yılına gelindiğinde kayda değer bir artış göstermiştir. Yaklaşık bu on yıllık süre içerisinde hem devlet teşvikleri hem de özel sektörün ilgisi sayesinde güneş enerjisi yatırımları hız kazanmıştır. Teknolojinin gelişimi ve maliyetlerin düşmesi, bu artışın en

büyük etkenleri arasında yer almıştır. 2023 yılı itibarıyla, Türkiye'nin kurulu güneş enerjisi kapasitesi birkaç yüz MW seviyesinden GW düzeyine ulaşmış ve ülkenin enerji portföyünde önemli bir yer edinmiştir.

Türkiye'nin hidroelektrik enerji kapasitesi ise, 2013 yılına kıyasla önemli bir artış göstermiş ancak bu artış, güneş enerjisine kıyasla daha sınırlı kalmıştır. Türkiye'de bölgesel bazda, en yüksek HES kurulu gücüne sahip 3 bölge sırasıyla, Güney Doğu Anadolu Bölgesi, Doğu Anadolu Bölgesi ve Karadeniz Bölgesi olurken, il bazında değerlendirilirse, sırasıyla Şanlıurfa, Elazığ, Diyarbakır, Adana ve Bingöl illeri Türkiye'de en yüksek HES kurulu gücüne sahip iller olarak ön plana çıkmaktadır. Türkiye'de GES kurulu güçleri, bölgesel bazda ve il bazında değerlendirilirse, İç Anadolu Bölgesi'nin ilk sırayı aldığı, Karadeniz Bölgesi'nin ise son sırada yer aldığı belirlenmiştir. Ayrıca, İç Anadolu Bölgesi'nde Konya İli, Akdeniz Bölgesi'nde Kahramanmaraş ili, Doğu Anadolu Bölgesi'nde Elazığ ili, Ege Bölgesi'nde İzmir ili, Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde Şanlıurfa ili, Karadeniz Bölgesi'nde Çorum ili ve Marmara Bölgesinde Bursa ili GES kurulu güçleri bakımından ön plana çıkmaktadır.

Mevcut su kaynaklarının potansiyelinin büyük oranda kullanılması ve yeni baraj projelerinin çevresel ve sosyal etkilerinin daha fazla gündeme gelmesi, hidroelektrik yatırımlarını sınırlayan başlıca faktörler olmuştur. Ayrıca, mevcut santrallerin bakımı ve modernizasyonu da önemli bir maliyet ortaya çıkmaktadır. Mevcut kurulu gücün artırılması ve henüz kullanılmayan potansiyelin değerlendirilmesi, Türkiye'nin yenilenebilir enerji hedeflerine ulaşmasında kritik bir rol oynayacaktır. Ancak, bu süreçte çevresel ve sosyal etkilerin göz önünde bulundurulması, su kaynaklarının sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi ve modern teknolojilerin entegrasyonu büyük önem taşımaktadır. Bununla birlikte, hidroelektrik enerji, Türkiye'nin enerji arz güvenliğinde kritik bir rol oynamaya devam etmektedir.

Türkiyede fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak açısından, gerek Hidroelektrik enerji üretimi, gerekse Güneş enerjisinden yararlanarak enerji üretimi yatırımlarına, temiz enerji temelinde eşit yaklaşılması daha doğru bir yaklaşım

olacaktır. Yine ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarından maksimum düzeyde yararlanma açısından araştırmalar ve yatırımlar sürdürülmelidir. Ülkemizde temiz enerji üretimi açısından, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı çeşitlendirilerek, güneş, rüzgar, hidroelektrik, YGES (Yüzer Güneş Enerji Santralleri) ve diğer kaynaklarla birlikte sürdürülebilir bir enerji planı ortaya koymak gelecek yıllarda enerji bağımlılığını büyük ölçüde azaltacaktır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 6

Kaynaklar

- [1] Y.S. Tanrıku ve N.S. Partigöç, Güneş enerjisi santrallerinin (GES) coğrafi bilgi sistemleri (CBS) tabanlı analitik hiyerarşi süreci (AHS) yöntemi ile yer seçimi: Denizli ili örneği. Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 60, 401-418, 2024. <https://doi.org/10.30794/psubed.1384299>
- [2] Global energy investment in clean energy and in fossil fuels, 2015-2023 – Charts – Data & Statistics” IEA. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-energy-investment-in-clean-energy-and-in-fossil-fuels-2015-2023>, Erişim 23.01.2024.
- [3] Executive summary – Hydropower Special Market Report Analysis, IEA. <https://www.iea.org/reports/hydropower-special-market-report/executive-summary>, erişim 21.01.2024.
- [4] 2021 Hydropower Status Report. <https://www.hydropower.org/publications/2021hydropower-status-report>, Erişim 04.09.2024.
- [5] M. Taşova, Türkiye’ nin güneş enerjisi parametre değerleri ve güneş enerjisinden faydalanma olanakları. İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, 7(3), 2018.
- [6] E. Nedimoğlu, B. Gümüş, Şebekeye bağlı güneş enerjisi santrallerinin harmoniklerine etki eden parametrelerin araştırılması, DÜMF MD, 10(3), 10-17 2019. <http://doi: 10.24012/dumf.605070>.
- [7] E. Kapluhan, Enerji coğrafyası açısından bir inceleme: güneş enerjisinin Dünya’ daki ve Türkiye’ deki kullanım durumu. Coğrafya Dergisi, 29, 70-98 2015. <https://doi.org/10.14781/mcd.98631>.
- [8] Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>, erişim 23.01.2024
- [9] V. Süme, S.S. Firat, Hidroelektrik santraller ve Trabzon ilinde bulunan hidroelektrik santrallerin şehir ve Doğu Karadeniz havzası için önemi, Türk Hidrolik Dergisi / TJH, 4(1), 10-24, 2020. <http://doi.10.47898/ijeased.757100>.
- [10] E. Mutlu, Türkiye’ de yenilenebilir enerji ekonomisi ve Ankara iline ait SWOT analizi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Türkiye, 2013.
- [11] S. E. Bülbül, Y. Çokluk, Türkiye’ de gelişen enerji sektörü HES’ ler ve kâr kaybı sigortaları, JFRS, 9(17), 2017. <https://doi.org/10.14784/marufacd.346188>.
- [12] T.C. Stamey, Summary of data-collection activities and effects of flooding from tropical storm Alberto in parts of Georgia, Alabama, and Florida, July 1994, US Geological Survey, Reston, VA, 96-228, 1996. <https://doi.org/10.3133/ofr96228>.
- [13] E.F. Moran, M.C. Lopez, N. Moore, N Müller, D.W. Hyndman. Sustainable hydropower in the 21st century. Proc Natl Acad Sci U S A.,115(47), 11891-11898, 2018. <http://doi: 10.1073/pnas.1809426115>.
- [14] DSİ 2022 yılı resmi su kaynakları istatistikleri. <https://www.dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/1847>.
- [15] Tarım Orman Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü 2022 yılı faaliyet raporu. Ankara, 2023. <https://cdniys.tarimorman.gov.tr/api/File/GetFile/425/Sayfa/759/1107/DosyaGaleri/dsi2022faaliyetraporu.pdf>.
- [16] Türkiye İstatistik Kurumu Başkanlığı, Su ve Atıksu İstatistikleri, 2022 haber bülteni, Sayı:49607 <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Su-ve-Atiksu-Istatistikleri-2022-49607>.
- [17] Meteoroloji Genel Müdürlüğü - Mevsimlik Yağış Raporu, <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/ya-gis-raporu.aspx?b=m#sfB>, erişim 23.01.2024.
- [18] Tarım Orman Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Yenilenebilir Enerji Dairesi Başkanlığı, <http://enerji.dsi.gov.tr>, erişim 10.09.2024.
- [19] Türkiye hidroelektrik santralleri haritası, <http://coğrafyaharita.com/haritalarim/4e-2022-turkiye-hidroelektrik-santralleri-haritasi.png>, erişim 23.01.2024.
- [20] Enerji atlası, <http://www.enerjiatlası.com>, erişim 08.09.2024.
- [21] S.E.Ruşen, Karaman ili küresel güneş radyasyonunun heliosat metot kullanılarak belirlenmesi, ÖMÜ Müh. Bilim. Derg. 6(2), 467-474, 2017. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.341286>
- [22] Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA), <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx>, erişim 23.01.2024.
- [23] O.O. Yolcan, R. Köse, Türkiye’ nin güneş enerjisi durumu ve güneş enerjisi santrali kurulumunda önemli parametreler, Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 6(2), 2 Aralık 2020, <http://doi: 10.34186/klujes.793471>.
- [24] M. Öztürk, R. Kayabaşı, Güneş enerjisinin İç Anadolu Bölgesinde kullanılabilirliği ve sistem analizi, NÖHÜ Müh. Bilim Derg. 12(4) 1351-1359, 2023. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1310627>
- [25] Meteoroloji Genel Müdürlüğü Güneşlenme süreleri. <https://mgm.gov.tr/kurumici/turkiye-guneslenme-suresi.aspx>, erişim 23.01.2024.
- [26] S. Altınkök, A. Altınkök, Photovoltaic thermal PV/T solar panels and practical applications, Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 14(2), 683-699, 2024. <http://doi.10.31466/kfbd.1425077>.
- [27] TEİAŞ, 2024, <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/aylik-elektrik-uretim-tuketim-raporlari>

- [28] Irena, Future of solar photovoltaic: deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects, international renewable energy agency (IRENA), Abu Dhabi, 2019. <https://irena.org/publications/2019/Nov/Future-of-Solar-Photovoltaic>. erişim: 25 February 2020
- [29] N. Lee, U. Grunwald, E. Rosenlieb, H. Mirletz, A. Aznar, R. Spencer, S. Cox, Hybrid floating solar photovoltaics-hydropower systems: benefits and global assessment of technical potential, Renewable Energy, 162, 1415-1427, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.080>
- [30] M. Cox, The state of floating solar: bigger projects, climbing capacity, greentech media, new markets, 2019. <https://www.greentechmedia.com/articles/read/the-state-of-floating-solar-bigger-projects-and-climbingcapacity>.
- [31] H. Şenli, Yüzen güneş enerjisi sistemlerinin incelenmesi, çevresel katkıları ve Türkiye'deki barajların yüzen güneş enerjisi potansiyeli, Int. J. Adv. Eng. Pure Sci. 35(3), 428-427, 2023. <https://doi.org/10.7240/jeps.1261370>.
- [32] Su Dünyası. Devlet Su İşleri Vakfı Yayını. 190, 2024. <https://www.dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/768>.





Numerical analysis of debris cloud formation in UHMWPE wavy plates during hypervelocity impact

Hiper hız darbesi sırasında UHMWPE dalgalı plakalarda enkaz bulutu oluşumunun nümerik analizi

Asım Önder^{1,*} 

¹ Eskişehir Technical University, Department of Mechanical Engineering, 26555, Eskişehir, Türkiye

Abstract

This paper presents and analyses the numerical results of hypervelocity impact against ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) plates with four different surface wave profiles. UHMWPE wavy plates (WP) are intended to be used in Whipple Shield bumper plate, which is of paramount importance for space vehicles against micro-meteorite and orbital debris (MMOD) impact protection. Numerical work was carried out as a hybrid combination of smoothed particle hydrodynamics (SPH) and finite element modelling (FEM). Circular plates were subjected to hypervelocity impact of a spherical aluminium projectile travelling at 3000 m/s. The outcomes of the simulations were analysed in terms of debris cloud generation, projectile fragmentation, and impact energy dissipation performance of wavy plates, and compared with a conventional flat counterpart. Results of this study indicate that surface wave profile has a clear positive influence in terms of hypervelocity impact protection performance.

Keywords: Hypervelocity impact, Wavy plates, UHMWPE, SPH, Whipple shield

1 Introduction

Naturally occurring (macro/micro meteorites) or man-made objects (failed structures during space missions) freely floating in space are a constant threat to existing space missions. This threat is generally termed as micro meteorite and orbital debris – MMOD. When these objects come in contact with space vehicles, the outcome can be catastrophic as they can have tremendous amount of impact energy due to their very high velocities (>2000 m/s). In 1947, Fred Whipple introduced the multi-layer shielding system for the protection of space vehicles [1]. It is called the Whipple shield and the concept has been studied for many years by many researchers in the field [2–6]. The shielding concept continues to bear research value due to the latest two reports from European Space Agency [7,8], stating that the number of the free-floating objects is ever increasing.

A Whipple shield consists of an outer plate called bumper plate, an inner plate called pressure wall/witness plate, and a gap between these two plates. Bumper plate's function is generally to disintegrate the incoming objects and disperse it

Öz

Bu çalışma, dört farklı yüzey dalgası profiline sahip ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) plakalara karşı hiper hız etkisinin sayısal sonuçlarını sunmakta ve analiz etmektedir. UHMWPE dalgalı plakaların (WP), mikro göktaşı ve yörünge enkazına (MMOD) karşı darbe korumasında, uzay araçları için büyük önem taşıyan Whipple Kalkanı tampon plakasında kullanılması amaçlanmaktadır. Nümerik çalışma, yumuşatılmış parçacık hidrodinamiği (SPH) ve sonlu elemanlar modellemesinin (FEM) hibrit bir kombinasyonu olarak gerçekleştirilmiştir. Dairesel plakalar, 3000 m/s hızla hareket eden küresel bir alüminyum merminin hiper hızda çarpma etkisine maruz bırakılmıştır. Simülasyon sonuçları dalgalı plakaların enkaz bulutu oluşumu, mermi parçalanması ve darbe enerjisi dağıtma performansı açısından analiz edilmiştir ve geleneksel düz bir muadiliyle karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, yüzey dalga profilinin hiper hız darbesinden korunma performansı açısından açık bir şekilde olumlu etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Hiperhızlı darbe, Dalgalı plakalar, UHMWPE, SPH, Whipple kalkanı

as a debris cloud through the gap between the two layers in order to dissipate the impact energy.

To this date, Whipple shield configurations were investigated by researchers in the field from different perspectives. Christiansen and others studied the “stuffed” Whipple shield, introducing Nextel and Kevlar fabric in between aluminium bumper and rear wall plate [4]. Cour-Palais and Crews investigated multi-layer shock absorbing systems for NASA [9]. Nam and co-workers used aramid-epoxy composite material for their Whipple shield [10]. Ke and co-workers also studied stuffed Whipple Shield, but differently than previous versions, they introduces polymer foam material to the configuration [11]. Baluch, Park and Kim investigated Whipple Shields made out of carbon-epoxy composite laminates under oblique hypervelocity impact conditions [12]. Rogers and co-workers studied the response of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) and high density polyethylene (HDPE) thermoplastics to hypervelocity impact on flat Whipple Shields [13]. Pai and

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: aaonder@eskisehir.edu.tr (A. Önder)

Geliş / Received: 21.08.2024 Kabul / Accepted: 27.09.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1536717

other studied the effect of coating on the bumper shield plates when subjected to hypervelocity impact [14].

Existing literature showed that every Whipple shield incorporated flat bumper plates regardless of the configurations investigated. To freshen the interest in the subject, a very recent effort has been made by the author of this paper, and wave profiles were introduced to bumper plates instead of flat surfaces. This study is a follow up to the author's recently published paper [15], and it contributes to the existing literature by extending the newly proposed wavy plate (WP) concept through the use of a completely different material (UHMWPE) compared to the previous research.

Four UHMWPE bumper plates with different surface wave profiles were studied under hypervelocity impact condition. Initial velocity of the aluminium spherical projectile was defined as 3000 m/s. WPs' behaviour on projectile fragmentation and debris cloud generation was investigated and compared both within each other and with flat bumper plate as well. In addition, performances of WPs to absorb and dissipate impact energy were presented.

2 Material and method

2.1 Materials and surface wave geometry

Since this paper extends the previous published study of the author [15], most of the details regarding the elements of the numerical modelling stay the same, except for the material used (hence material models) for WPs. Therefore, for the sake of conciseness, a brief description of those elements is provided here, however the parent study could be viewed for further specific details if needed.

Hypervelocity impact scenario studied in this paper consists of three elements: spherical impactor representing space debris; flat/wavy plate representing the bumper plate of a Whipple Shield; and finally witness plate representing the wall of a pressured space vessel.

Aluminium spherical projectile with a 5 mm diameter was used in all the simulations as the impacting object. Impact velocity was chosen as 3000 m/s for comparison with the previous studies and for staying inside the validated material model boundaries. Four different surface wave profiles (WP1 to WP4) were considered, and their geometric details can be seen in Figure 1. All the WPs have 1 mm of section thickness, and they are 50 mm in diameter. Design rationale of these WPs was to gradually deviate from flatness: i.e., WP4 has a shallower wave depth compared to others, while WP3 has a deeper wave depth, and so on. These WPs were compared with the conventional flat plate Whipple Shield bumper plate in terms of their behaviour on disintegrating the projectile and also their destruction patterns to generate a debris cloud. UHMWPE composite material (under Dyneema commercial name) was used for flat plate and four WPs in all the hypervelocity impact simulations performed in this study. UHMWPE material is produced by gel-spinning followed by hot drawing. Fibres formed after this process can be oriented unidirectionally and hot-pressed into desired direction and layers to form a layered fibre reinforced composite material. For the present study, configuration of these fibres was cross-ply or $[0^\circ/90^\circ]$, hence fibres are positioned along x (0°) and y (90°) direction (in-plane), providing an orthotropic material.

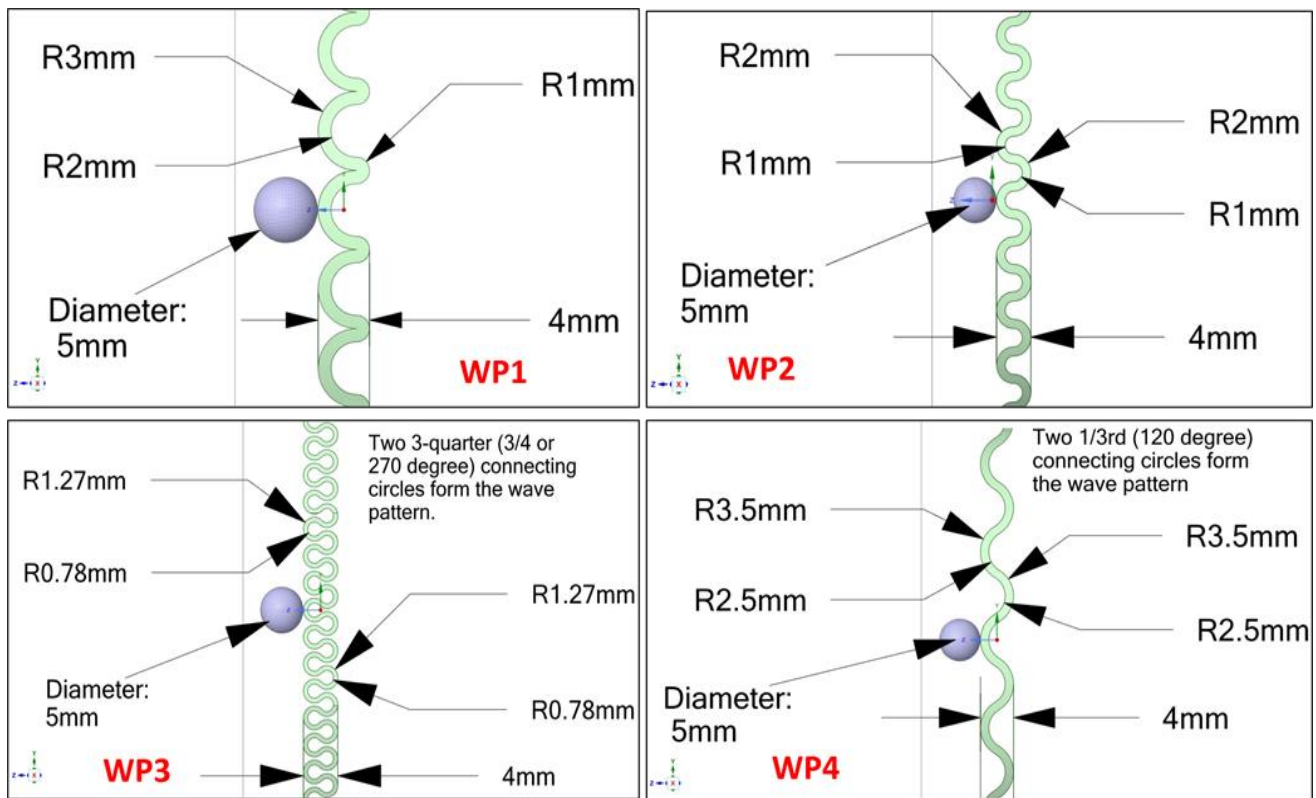


Figure 1. Section geometries of wave plates investigated in this study [15]

Al 1100 aluminium material was used for the spherical projectile. In order to assess the effect of debris cloud generated after impact, a witness plate is generally used behind the bumper plate. Al 2024-T4 aluminium material was considered for the witness plate which has 100x100x0.5 mm dimensions, which have been extensively used in the field by many researchers ([16–18]).

2.2 Numerical modelling

ANSYS Autodyn software was used for the hybrid numerical modelling performed in this study. Hybrid models incorporate the use of finite elements (FE) approach and smoothed particle hydrodynamics (SPH) approach together. SPH method is advantageous when extremely high loading and strain rates are of concern. These rates are so high that the solid material behaves almost like a fluid, even experiencing vaporisation due to the temperatures above melting temperature. In SPH method, material is represented by spherical particles with a certain size, and the movement of these particles allows the calculation of very large and quick deformations more effectively compared to FE approach. For this reason, SPH modelling is more suitable for the projectile and target bumper plate models as excessive deformation and failure behaviour happen during the hypervelocity impact phenomenon.

On the other hand, witness plate was modelled with finite element approach since the function of the witness plate in simulation is much less complex compared to the bumper plate, displaying only the extend and shape of failure.

Input data for the UHMWPE material model used in the simulations were obtained from Lassig and co-workers' extensive study [19]. As authors stated, this data set was validated with the physical testing carried out in the aforementioned reference (in Section 3.4 and Section 4 of [19]), in both quasi-static and dynamic environments. Input data of Al 1100 and Al 2024-T4 for the projectile and witness plate, respectively, was already present in the material library embedded in Autodyn software. Material data and modelling parameters regarding these materials can be found in Appendix at the end of this study.

Since very high strain rates are experienced during a hypervelocity impact, all three materials were modelled with a suitable shock equation of state material model. Linear Polynomial Equation of State (EOS) was used to model shock response of all the materials considered in this study. In addition to shock properties, Al 1100 and Al 024-T4 were modelled with Johnson-Cook Strength and Failure models, while UHMWPE material was modelled with Orthotropic Elasticity, and Orthotropic Failure and Softening material model. More details on theory can be found in [19] and [15] for UHMWPE and aluminium materials models, respectively.

The rest of the numerical model details are: 0.2 mm SPH particle size was used for both bumper plates and projectile, the witness plate was meshed using Lagrangian finite elements with a fixed 2 mm mesh size. Witness plate was modelled with zero degree of freedom from its four thin

surfaces. For all impact scenarios, the projectile's impact trajectory direction was perpendicular.

3 Results and discussion

3.1 Analysis of fragmentation and debris cloud patterns

This section presents fragmentation of the projectile and the shape/characteristics of the debris cloud generated by the projectile and bumper plate after the hypervelocity impact. To ease the understanding, front, top, and right views of every plate were given. A general comparative figure (Figure 8) incorporating every plate investigated was also provided at the end of this section for a clear distinction. Firstly, the analysis of impact against flat plate is given to realise whether or not UHMWPE material influences the debris cloud characteristics compared to aluminium. Analysis of WPs will be presented next, revealing the differences and similarities compared to flat plate impact.

Figure 2 shows how the flat UHMWPE plate reacted to the impact. It can be clearly seen from front view that a cross shaped failure exists due to the fibre alignment along 0° (x axis - horizontal) and 90° (y axis - vertical). This is an indication that the shock wave created by the hypervelocity impact travels along fibre directions. This behaviour is different when compared to a metallic (isotropic material) plate counterpart, in which the shock wave travels in every direction, like an expanding circle in-plane (360° degree). When the shock wave reaches to the periphery of the plate, some part of it is reflected back from the plate boundary, and the remaining part causes tension loading to the fibres. This repetitive shock wave loading leads to fibre rupture which can be seen in Figure 2 along the fibre orientations. Shock waves travel in through-thickness direction as well and again they are partially reflected back and forth at the material boundary, which are the front and back side of the plate. Top and right views of Figure 2 show that same cross-shape failure along fibre directions existed at the back side of the plate as well.

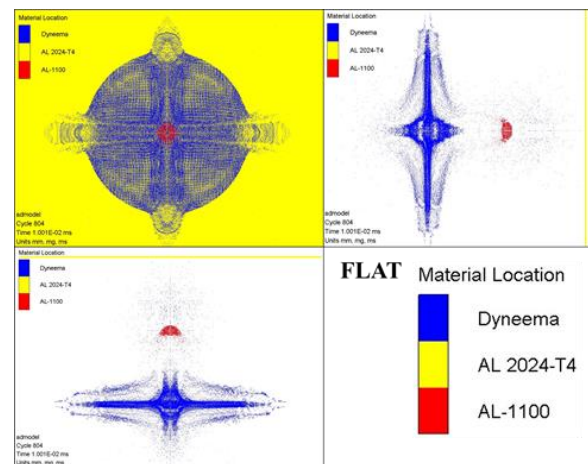


Figure 2. Front (top left), right (top right), and top (bottom left) views of the debris cloud in UHMWPE flat plate impact scenario at 10 μs

These observations are considerably different compared to an aluminium flat plate impact (Figure 3) which exhibits only a hole at the impact location slightly larger than the projectile diameter [15]. Debris cloud pattern and shape such as in Figure 3 formed from aluminium bumper material are reported by many researchers in literature, both experimentally and numerically [2,11,20–22].

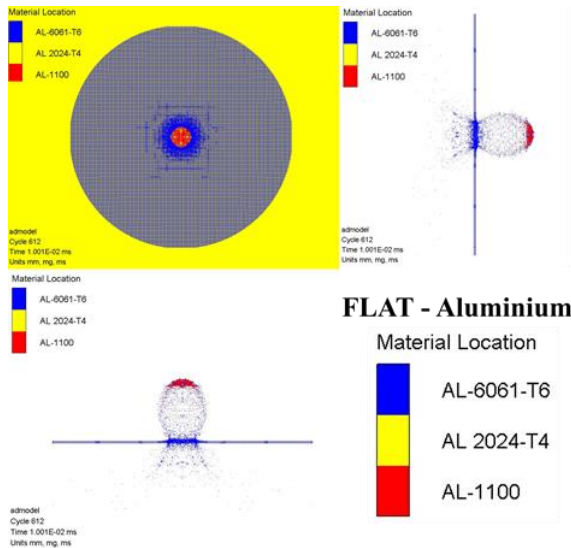


Figure 3. Front (top left), right (top right), and top (bottom left) views of the debris cloud in aluminium flat plate impact scenario at 10 μ s

When UHMWPE flat plate and aluminium plate are compared (top and right views of Figure 2 and Figure 3), failure pattern influences the debris cloud generated after impact such that the horizontal and vertical spread angle of the plate particles at the impact location is greater and particles spread nonuniformly in UHMWPE impact case. These result in a less dense particle cloud generated at the vanguard of the projectile at the same time interval (10 μ s).

On the other hand, fragmentation of the projectile in UHMWPE flat plate is similar to what has been observed in aluminium counterpart, but from Figure 2 and Figure 3, it can be said that aluminium plate is more effective in disintegrating the projectile, as greater portion of the projectile particles can be seen connected to each other in UHMWPE case.

Figure 4 through Figure 7 show the reaction of WPs to the hypervelocity impact with the same boundary and loading conditions mentioned earlier. One of the common observations for all the WPs is that the deformation in vertical direction caused by the impact failed to reach to the edges of each plate, unlike the deformation in horizontal direction, which separated WPs into two pieces. In addition, the failure and the resulting debris cloud occurred at the front surface (impact side) and the back surface are different for each respective WP. These outcomes are significantly different than what has been observed from both the aluminium flat plate impact reported in the existing literature, and from UHMWPE flat plate reported earlier in

this study. This reaction can clearly be associated to the existence of wave patterns of each WP.

When the right and top views of each wave profile impact are compared in Figure 8, it can be seen that they resulted in a slightly different debris cloud at the back side of the WPs. The main reason for the debris cloud dispersion characteristic is the interaction timing and angle difference between the failed projectile particles and the shape of each wave pattern [15]. When the projectile deforms during the impact, failed particles at the front of the projectile starts to spread and move in vertical direction and meet with the bulges and dents of each wave pattern at a slightly different time and impact angle, generating a different debris cloud shape.

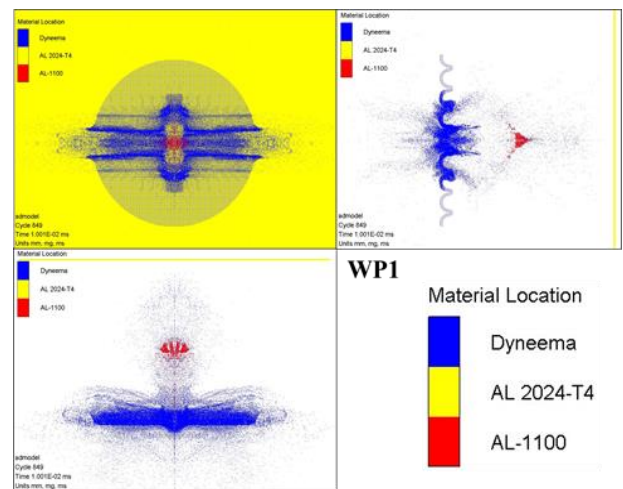


Figure 4. Front (top left), right (top right), and top (bottom left) views of the debris cloud in WP1 impact scenario at 10 μ s

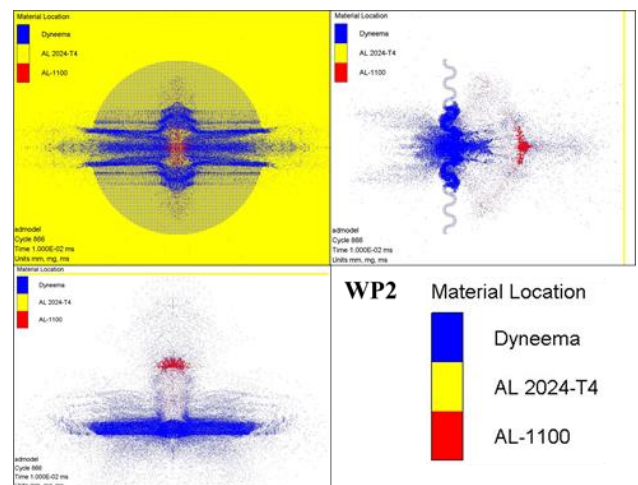


Figure 5. Front (top left), right (top right), and top (bottom left) views of the debris cloud in WP2 impact scenario at 10 μ s

The largest spread of the debris cloud was observed for WP2, while in WP3 the debris cloud appeared as more confined compared to other WPs. WP1 exhibited similar debris cloud characteristics compared to WP2. WP4

experienced a vertically narrower debris cloud compared to the other WPs. In terms of projectile fragmentation, WP1, WP2, and WP4 causes a sharp-tipped deformation, while WP3 causes a blunt-tipped deformation compared to others as right views in Figure 8 show. Projectile particles were deformed more in vertical direction in WP2 compared to other WPs (Figure 5 and Figure 8). From the top views in Figure 8, it can be seen that all the projectiles were deformed similar to each other.

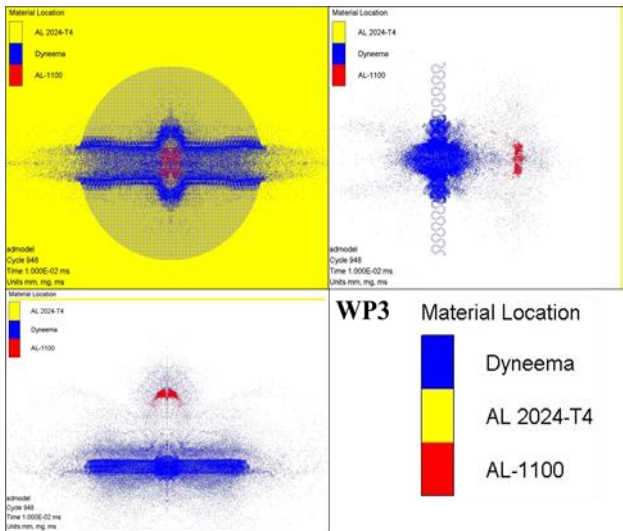


Figure 6. Front (top left), right (top right), and top (bottom left) views of the debris cloud in WP3 impact scenario at 10 μs

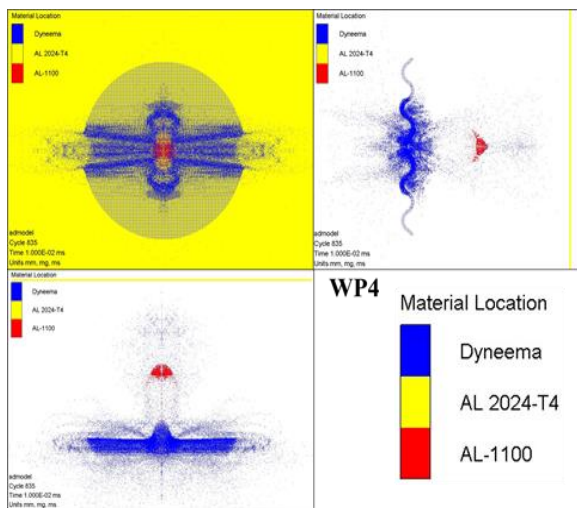


Figure 7. Front (top left), right (top right), and top (bottom left) views of the debris cloud in WP4 impact scenario at 10 μs

From the results given above, following discussions can be derived:

- Compared to flat plate counterpart, wave profile clearly has an influence on projectile fragmentation and debris cloud characteristics.
- WP4 has a shallower wave profile, while WP1, WP2, and WP3 has a deeper wave profile. Thus, deviation

from flatness to waviness result in a more unorganised debris cloud as the impact of failed projectile fragments with the wave pattern becomes less predictable.

- On the other hand, as the wave pattern becomes deeper, the vanguard of the projectile becomes flatter during fragmentation. This is due to the fact that more material comes in contact with the projectile, hence providing more resistance.

In addition to the bumper plate failure analysis, an assessment of the potential hazard experienced from the debris cloud was also investigated by visual inspection of the damage done to the witness plate in every scenario. Thickness of each witness plate were deliberately selected as 2 mm to reveal the potential effect of the debris cloud. Since witness plate represents the outer most layer of a pressurised space vehicle, they are not designed as thin in a real-life case. Figure 9 shows the failure shape and dimensions of each witness plate positioned 50 mm away from the bumper plate. Obviously, as the distance between the bumper plate and witness plate changes, the distance that particles of the debris cloud travel changes as well, consequently affecting the characteristics of the damage done. However, there is no standard distance defined for a Whipple shield configuration and many different gaps were studied in the existing literature. For the sake of a lower computational effort and a faster calculation timing, distance between layers were selected as 50 mm.

From Figure 9, it can be seen that failure shapes and dimensions of each witness plate are similar. When compared with the flat counterpart, all WPs resulted in a debris cloud such that its effect on the witness plate deviates from a full circle to an ellipse shape. However, this effect is not straightforward as it was for the bumper plate. While witness plates of WP1 and WP2 has a narrower vertical failure compared to horizontal, witness plates of WP3 and WP4 has the opposite failure shape. Moreover, since WP4 has the shallowest wave profile and WP3 has the deepest wave profile, it is difficult to make a direct conclusion regarding the effect of wave profile on the witness plate failure shape.

It should be noted here that the main element of the debris cloud which causes complete perforation or rupture failure to the witness plate is the fragmented projectile. During the hypervelocity impact, the integrity of the projectile is greater compared to the bumper plate. Therefore, projectile is mainly responsible for the holes occurred in witness plate. On the other hand, particles of the bumper plate (mixed with projectile particles) are responsible for the secondary damage done to the witness plate. This secondary plastic failure can be seen at the inset of each WP in Figure 9. Bordered small green-red figures of each WP indicates the status of the Al 2024-T4 material. “Material Status” contour legend shows whether the material has voids (white), or it is in hydrostatic pressure (blue), elastic undamaged state (green), or in plastic failure state (red). Plastic failure (red areas) of each witness plate is considerably different than the other, and the difference is especially clear between the WPs and the flat plate.

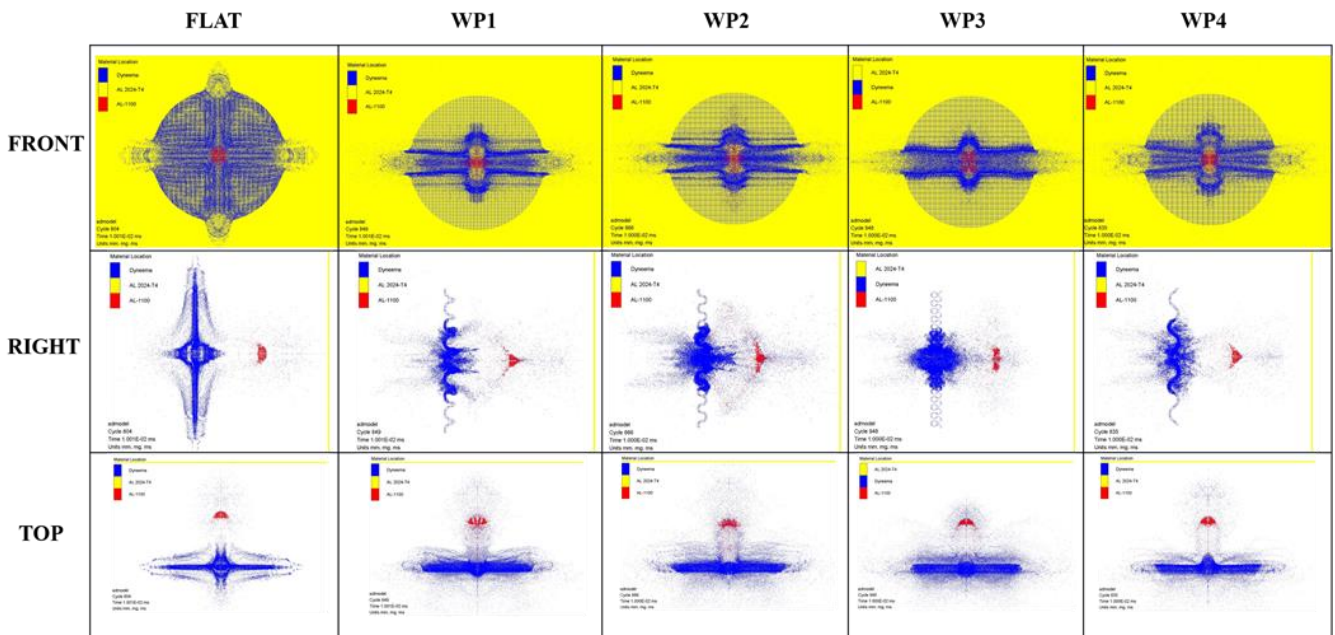


Figure 8. Overall comparison of front, right, and top views of WPs and flat plate at 10 μ s

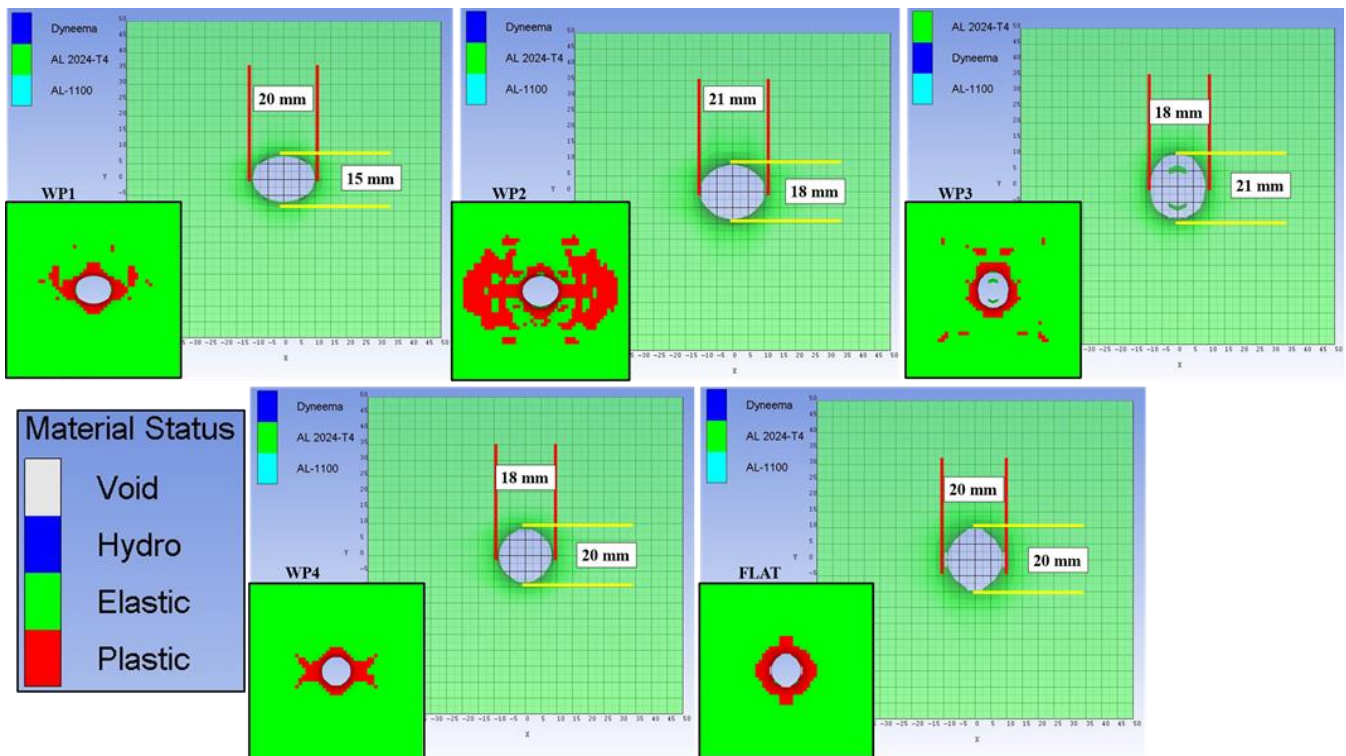


Figure 9. Comparison of witness plate (Al 2024-T4) damage in WPs and flat plate at the end of the simulations (at 50 μ s)

In WP1, WP3, and WP4, plastic failure occurs in close perimeter of the hole, while in WP2 the plastic failure spread widely, almost reaching to the edges of the witness plate. This result makes the debris cloud generated by WP2 as the most hazardous compared to others. On the contrary, debris cloud generated by WP3 can be considered as the least hazardous since the areas exhibiting plastic failure are more

scattered compared to WP1 and WP4 (even though the failure areas are similar).

3.2 Analysis of impact energy dissipation

Effectiveness of WPs was carried out through energy absorption analysis. During a hypervelocity impact, kinetic energy of the projectile is dissipated by various mechanisms such as failure of the bumper plate, mechanical contact

friction between bodies, and heat transfer mechanisms due to friction. In this study, the mass of the aluminium projectile was 0.18 gr. Combined with a 3000 m/s impact velocity, this mass results in an impact energy of 810 J. Figure 10 shows how the kinetic energy of the projectile changes during each hypervelocity impact against WPs and flat plate. There are two decreasing areas in the graph; the first one is right at the start of the impact which is due to the contact between the projectile and bumper plate, and the second one is when the fragmented projectile penetrates the bumper plate and comes into contact with the witness plate. Since witness plate represents the wall of a pressurised space vehicle and it is same for every scenario in this study, it is more important to evaluate the change in the kinetic energy before the projectile hits to the witness plate. As Figure 10 shows, every WP performed better than the flat plate, decreasing the kinetic energy of the projectile more compared to flat plate. WP2 appears as the most effective plate, followed by WP3 and WP1. WP4 displays the least performance among WPs, but still outperforms the flat plate. It can be derived from Figure 10 that a deeper wave pattern could be more effective in dissipating the impact energy.

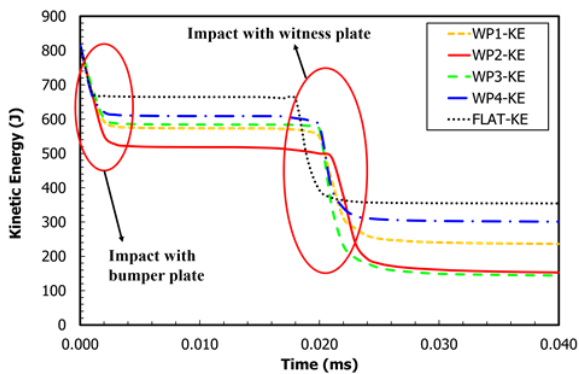


Figure 10. Kinetic energy change of the projectile during hypervelocity impact with WPs and flat plate

The decrease in projectile’s kinetic energy indicates that a resistance is provided by the bumper plate, and this transferred impact energy causes deformation through various damage mechanisms. Therefore, bumper plate’s internal energy increases as the projectile’s kinetic energy decreases. Table 1 shows the change in internal energy of the WPs and flat plate at the end of the hypervelocity impact. In the same table, masses of each bumper plate were given as well to calculate the energy absorbed per mass (specific energy absorption) for a more meaningful comparison. In parallel with the kinetic energy dissipation, all the WPs outperformed flat plate in terms of energy absorption, WP3 and WP2 performing better compared to WP1 and WP4. From the specific energy absorption perspective, WP3 was ranked as first and WP1 was ranked as last, even lower than flat plate. This is an interesting finding since WP1 was the second best at decreasing the kinetic energy of the projectile and outperforming WP4 and flat plate.

Table 1. Impact energy absorbed by each plate

	Mass (gr)	Internal Energy (J)	Specific energy absorption (J/gr)
WP1	3.02	171	56.623
WP2	3.01	230	76.412
WP3	3.2	257	80.313
WP4	2.33	146	62.661
FP	1.92	125	65.104

3.3 General discussion

Previous sections analysed and explained the outcome of hypervelocity impact simulations and highlighted the important points and improvements. It is worth mentioning some details to avoid confusion and to reveal the potential of this study better.

The main aim of introducing a surface wave profile to the Whipple shield bumper plate is to enhance the protection ability of the shield configuration. This has been proven in a previously published study of the author [15] even though numerically. This study however was aimed to take the wave pattern concept a step further by investigating a completely different material. Previous study was done using an isotropic material (aluminium), but current study was carried out with an orthotropic/anisotropic material (UHMWPE fibre composite). This is a major difference because failure mechanisms of these two materials are completely different, composite material being much more complex. Therefore, results of this study also showed that a wave profile has a potential to be used with different material families.

It could be argued that the current study relies on only numerical results. It is true that a physical experimentation has not been done. However this does not mean the results are far from being practical, because the material model parameters used in this study were validated by respective authors (as cited previously) within the specific boundary conditions (velocity, temperature, pressure, etc.) used in this study. That is to say, if a material data was validated at e.g. 500 m/s impact condition, it is not reliable to use that data in e.g. 2000 m/s impact scenario, because the difference in velocities could well result in a considerable strain rate change, consequently the material behaviour could change as well. Nevertheless, this was not the case for the current study as the material model data is inside the validation conditions.

Another point that the reader might wonder is that the damage exhibited by the WPs investigated. In numerical study, the bumper plates could be seen ruptured horizontally. This is another major difference of UHMWPE compared to aluminium. However, this study focuses on the generation of the debris cloud which includes bumper plate and projectile particles, and its characteristics, because one of the main functions of the bumper plate is to disintegrate the incoming impacts from MMOD, turning them into a cloud of much smaller particles. So it can be considered as a sacrificial layer of the shielding system. Naturally, the integrity of the bumper plate is of course important, and it could be further investigated in a future study with bigger size plates. For the current study, in order to save computational effort, relatively smaller plates were considered. In addition, thickness of UHMWPE composite material in this study was 1 mm. Compared to an aluminium counterpart, this thickness

results in UHMWPE plate masses being approximately 1/3rd of the mass of the aluminium plates. So composite plates with higher thicknesses can be more beneficial and effective in future studies.

4 Conclusion

To extend the newly proposed wavy plate concept to a wider material family, this paper investigated the response of wavy bumper plates made out of UHMWPE against hypervelocity impact. What makes this study novel is the fact that no similar configuration (material-geometry) has been studied and reported before in the existing literature.

Four UHMWPE bumper plates with different surface wave profiles were subjected to hypervelocity impact of an aluminium spherical projectile travelling at 3000 m/s. Their behaviour on projectile fragmentation and debris cloud generation was investigated and compared both within each other and with flat bumper plate as well. In addition, performances of WPs to absorb and dissipate impact energy were presented.

Rupture of witness plates appear similar in each scenario with minor differences, but the plastic failure experienced by the witness plates were considerably different in WPs compared to flat plate. In addition, WPs have shown better performance in dissipating the kinetic energy of the projectile compared to the flat counterpart.

The results show that using orthotropic materials such as UHMWPE in Whipple Shield bumper plate with a wavy surface considerably changes the debris cloud characteristics and projectile fragmentation generated during a hypervelocity impact compared to a flat surface bumper plate. This can be considered as an improvement for the wavy bumper plate concept since previous research of wavy surface was incorporating isotropic materials such as aluminium. Therefore, it has been proven that additional family of materials have the potential to be used with a wavy surface in Whipple Shield configurations.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): %19

References

- [1] F.L. Whipple, Meteorites and space travel, *Astronomical Journal*, 52, 131, 1947. <https://doi.org/10.1086/106009>.
- [2] M. V. Silnikov, I. V. Guk, A. F. Nechunaev, and N.N Smirnov, Numerical simulation of hypervelocity impact problem for spacecraft shielding elements, *Acta Astronautica*, 150, 56–62, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.08.030>.
- [3] S. Ryan and E. L. Christiansen, Hypervelocity impact testing of advanced materials and structures for micrometeoroid and orbital debris shielding, *Acta Astronautica*, 83, 216–31, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2012.09.012>.
- [4] E. L. Christiansen, J. L. Crews, J. E. Williamsen, J. H. Robinson, and A. M. Nolen, Enhanced meteoroid and orbital debris shielding, *International Journal of Impact Engineering*, 17, 217–28, 1995. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(95\)99848-L](https://doi.org/10.1016/0734-743X(95)99848-L).
- [5] A. Pai, R. Divakaran, S. Anand, and S. B. Shenoy, Advances in the Whipple Shield Design and Development: A Brief Review, *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 8, 20–38, 2022. <https://doi.org/10.1007/s40870-021-00314-7>.
- [6] K. Wen, X. W. Chen, and Y. G. Lu, Research and development on hypervelocity impact protection using Whipple shield: An overview, *Defence Technology*, 17, 1864–86, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.11.005>.
- [7] S. Lemmens and F. Letizia, ESA'S Annual Space Environment Report, ESA Space Debris Office, Darmstadt, Germany, GEN-DB-LOG-00288-OPS-SD, 22 April 2022.
- [8] S. Lemmens and F. Letizia, ESA's Annual Space Environment Report, Darmstadt, Germany, GEN-DB-LOG-00271-OPS-SD, 30 April 2019.
- [9] B. G. Cour-Palais and J. L. Crews, A multi-shock concept for spacecraft shielding, *International Journal of Impact Engineering*, 10, 135–46, 1990. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(90\)90054-Y](https://doi.org/10.1016/0734-743X(90)90054-Y).
- [10] Y. W. Nam, S. K. Sathish Kumar, V. A. Ankem, and C. G. Kim, Multi-functional aramid/epoxy composite for stealth space hypervelocity impact shielding system, *Composite Structures*, 193, 113–20, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.03.046>.
- [11] F. W. Ke, J. Huang, X. Z. Wen, Z. X. Ma, and S. Liu, Test study on the performance of shielding configuration with stuffed layer under hypervelocity impact, *Acta Astronautica*, 127, 553–60, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.06.037>.
- [12] A. H. Baluch, Y. Park, and C. G. Kim, Hypervelocity impact on carbon/epoxy composites in low Earth orbit environment, *Composite Structures*, 96, 554–60, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.09.010>.
- [13] J. A. Rogers, A. Mote, P. T. Mead, K. Harrison, G. D. Lukasik, K. R. Kota, W. D. Kulatilaka, J. W. Wilkerson, and T. E. Lacy, Hypervelocity impact response of monolithic UHMWPE and HDPE plates, *International Journal of Impact Engineering*, 161, 104081, 1-11, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.104081>.
- [14] A. Pai, A. Sharma, I. M. Eby, C. R. Kini, and S. B. Shenoy, A numerical approach for response of whipple shields with coated and monolithic front bumper to hypervelocity impact by spherical projectiles, *Acta Astronautica*, 202, 433–41, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.10.041>.
- [15] A. Önder, Projectile fragmentation and debris cloud formation behaviour of wavy plates in hypervelocity impact, *International Journal of Impact Engineering*, 183, 104788, 1-13, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104788>.
- [16] Z. Song, X. Pei, J. Yu, J. Zhao, and F. Tan, Hypervelocity impact tests on a Whipple shield using a flyer plate in the velocity range from 4 km/s to 12 km/s, *International Journal of Impact Engineering*, 156,

- 103899, 1-14, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.103899>.
- [17] G. R. Johnson and W. H. Cook, A Computational Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strain, High Strain Rates and High Pressures, The Seventh International Symposium on Ballistics, pp. 541–547, Hague, Netherlands, 1983.
- [18] H. B. Zeng, S. Pattofatto, H. Zhao, Y. Girard, and V. Fascio, Perforation of sandwich plates with graded hollow sphere cores under impact loading, *International Journal of Impact Engineering*, 37, 1083–91, 2010.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.05.002>.
- [19] T. Lässig, L. Nguyen, M. May, W. Riedel, U. Heisserer, H. Van Der Werff, and S. Hiermaier, A non-linear orthotropic hydrocode model for ultra-high molecular weight polyethylene in impact simulations, *International Journal of Impact Engineering*, 75, 110–22, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.07.004>.
- [20] K. Wen, X. W. Chen, R. Q. Chi, and Y. G. Lu, Analysis on the fragmentation pattern of sphere hypervelocity impacting on thin plate. *International Journal of Impact Engineering*, 146, 103721, 1-15, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103721>.
- [21] K. Loft, M. C. Price, M. J. Cole, and M. Burchell, Impacts into metals targets at velocities greater than 1 km/s: A new online resource for the hypervelocity impact community and an illustration of the geometric change of debris cloud impact patterns with impact velocity, *International Journal of Impact Engineering*, 56, 47–60, 2013.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2012.07.007>.
- [22] J. Mespoulet, P. L. Hérel, H. Abdulhamid, P. Deconinck, and C. Puillet, Experimental study of hypervelocity impacts on space shields above 8 km/s, *Procedia Engineering*, 204, 508-515, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.748>.



Appendix

Numerical model parameters of Al 1100 and Al 2024-T4

Parameter (unit)	Al 1100	Parameter (unit)	Al 2024-T4
Johnson-Cook Strength		Steinberg Guinan Strength	
Shear Modulus (kPa)	2.59E+07	Initial Yield Stress (kPa)	2.60E+05
Yield Stress (kPa)	4.10E+04	Max Yield Stress (kPa)	7.60E+05
Hardening constant (kPa)	1.25E+05	Hardening Constant	310
Hardening exponent (none)	0.183	Hardening Exponent	0.185
Strain rate constant (none)	0.001	Derivative dG/dP G'P	1.8647
Thermal Softening Exponent (none)	0.859	Derivative dG/dT G'T (Pa/C)	-1.76E+07
Melting temperature (K)	893	Derivative dY/dP Y'P	0.01695
Reference Strain Rate (1/s)	1	Melting Temperature (C)	946.85
Johnson-Cook Failure		Grady Spall Failure	
Damage constant – D1 (none)	0.071	Critical Strain Value	0.15
Damage constant – D2 (none)	1.248	Shear Modulus (kPa)	2.86E+07
Damage constant – D3 (none)	-1.142	Shock EOS Linear	
Damage constant – D4 (none)	0.0097	Gruneisen Coefficient	2
Damage constant – D5 (none)	0	Parameter C1 (m/s)	5328
Melting Temperature (K)	893	Parameter S1	1.338
Reference Strain Rate (1/s)	1	Parameter Quadratic S2 (s/m)	0
Linear Polynomial EOS			
Bulk Modulus – A1 (kPa)	7.42E+07		
Parameter A2 (kPa)	6.05E+07		
Parameter A3 (kPa)	3.65E+07		
Parameter B0 (none)	1.96		
Parameter B1 (none)	0		
Parameter T1 (kPa)	7.42E+07		
Parameter T2 (kPa)	0		
Reference Temperature (K)	293		
Specific heat (J/kgK)	910	Specific Heat (J/kgK)	863
Thermal conductivity (J/mKs)	0		

Numerical model parameters of UHMWPE (Dyneema)

Orthotropic linear elastic model (stiffnesses and Poisson's ratios)		Polynomial EOS (coefficients)		Orthotropic failure and softening (tens. fail. stresses and fracture toughnesses)	
E11 & E22 [GPa]	26.9	A1 [GPa]	7.04	σ_{11fail} & σ_{22fail} [MPa]	753
E33 [GPa]	3.62	A2 [GPa]	10	σ_{33fail} [MPa]	1.07
ν_{12} [-]	0	A3 [GPa]	0	τ_{31fail} [MPa]	1.01E+20
ν_{13} [-]	0.1	B0 [-]	3.864	τ_{12fail} [MPa]	35.2
ν_{23} [-]	0.5	B1 [-]	3.864	τ_{23fail} [MPa]	1.01E+20
G12 [MPa]	42.3	T1 [GPa]	7.04	GC11 & GC22 [J/m2]	30
G31 [MPa]	30.7	T2 [GPa]	0	GC33 [J/m2]	790
G23 [MPa]	30.7	Tref [K]	293	GC31 [J/m2]	1.46
		Spec. Heat [J/kgK]	1.85E+03	GC12 [J/m2]	1.46
		Thermal Conductivity	0	GC23 [J/m2]	1.46
				Dam. Coupl. Coeff.	5.00E-01
Orthotropic hardening model (coefficients and effective s-ε-values)					
Plasticity coefficients			Effective stress-strain-values		
a11 [-]	1.00E-05	$\sigma_{eff\#1}$ [kPa]	1.76E+02	$\epsilon_{eff\#1}$ [-]	1.82E-04
a22 [-]	1.00E-05	$\sigma_{eff\#2}$ [kPa]	9.89E+02	$\epsilon_{eff\#2}$ [-]	1.20E-03
a33 [-]	0.03	$\sigma_{eff\#3}$ [kPa]	1.74E+03	$\epsilon_{eff\#3}$ [-]	3.11E-03
a12 [-]	1.00E-06	$\sigma_{eff\#4}$ [kPa]	2.42E+03	$\epsilon_{eff\#4}$ [-]	6.92E-03
a13 [-]	1.00E-06	$\sigma_{eff\#5}$ [kPa]	3.10E+03	$\epsilon_{eff\#5}$ [-]	1.13E-02
a23 [-]	1.00E-06	$\sigma_{eff\#6}$ [kPa]	5.97E+03	$\epsilon_{eff\#6}$ [-]	2.83E-02
a44 [-]	1.75	$\sigma_{eff\#7}$ [kPa]	1.20E+04	$\epsilon_{eff\#7}$ [-]	5.78E-02
a55 [-]	1.75	$\sigma_{eff\#8}$ [kPa]	2.07E+04	$\epsilon_{eff\#8}$ [-]	1.06E-01
a66 [-]	1	$\sigma_{eff\#9}$ [kPa]	3.46E+04	$\epsilon_{eff\#9}$ [-]	1.06E-01
		$\sigma_{eff\#10}$ [kPa]	2.02E+08	$\epsilon_{eff\#10}$ [-]	1
Reference density [g/cm3]	9.80E-01				





Jeokimyasal süreçler ve yeraltısuyu kimyası: Akçaşehir Ovası (Karaman) örneği Geochemical processes and groundwater chemistry: A case study Akçaşehir Plain (Karaman)

Ayşen Davraz¹ , Fatma Aksever^{2,*} 

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta Türkiye

Öz

Bu çalışmada, Akçaşehir (Karaman) bölgesi yeraltısularının hidrokimyasal yapısı ve bu yapıyı oluşturan faktörler kimyasal analiz verileri kullanılarak araştırılmıştır. Değerlendirmelerde yeraltısuyunun kimyasal bileşiminin kökeni ve kontrol mekanizmaları; iyon oranı analizi, korelasyon analizi ve diğer hidrojeokimyasal yöntemlerle belirlenmiştir. Akçaşehir ovası Karaman ilinin kuzeydoğusunda yer almaktadır. Ova üzerinde yeraltısuyu temininde kullanılan çok sayıda sondaj kuyusu yer almaktadır. İnceleme alanının temelini Bolkar Dağı Birliği'ne ait allohton kayalar oluşturmaktadır. Bölgede serbest akifer özelliğindeki güncel çökeller ve sahip kireçtaşları yeraltısuyu bulunduran önemli akiferlerdir. Çalışmada su örneklerinin %74'ünün Mg-Ca-HCO₃/Ca-Mg-HCO₃'lü sular fasiyesinde olduğu belirlenmiştir. Bu yapıyı oluşturan en etkin hidrojeokimyasal süreç karbonat çözünümüdür. Bazı örneklerde tespit edilen Na⁺ ve SO₄²⁻ artışları silikat ayrışması ve iyon değişim süreçleri ile ilişkilidir. Genel olarak alanda su-kayaç etkileşiminin hidrojeokimyasal süreçleri doğrudan etkilediği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Jeokimyasal süreçler, Yeraltısuyu, Su kimyası, Akçaşehir (Karaman)

1 Giriş

Su kaynakları, kentsel sosyal üretimin normal ve istikrarlı işleyişini kolaylaştırmada, şehirlerin çok işlevli rolü için nesnel bir garanti sağlamada ve ekonomik faaliyetlerin gerçekleştirilmesini teşvik etmede önemli bir rol oynamaktadır [1, 2]. Günümüzde pek çok ülkede su kaynaklarında miktar bakımından azalma ve kalite problemleri yaşanmaktadır. Yüzeysel sularında bu olumsuzlukların daha fazla olması yeraltısularına yönelimin artmasına neden olmuştur. Yeraltısuları ülkemizde ve dünyada en önemli kullanılabilir su kaynağı haline gelmiştir. Yeraltısuyunda çözünmüş iyonların sınıflandırılması ve iyonların kökenlerinin tanımlanması, bu hayati kaynakların sürdürülebilir yönetimi açısından yöneticiler için yararlı bilgiler sağlamaktadır.

Yeraltısuyu kimyası özellikleri yalnızca yeraltısuyu kirliliğinin kaynağını belirlemek için değil aynı zamanda bir bölgedeki temel hidrokimyayı kontrol eden faktörlerin

Abstract

In this study, the hydrochemical structure of groundwater in the Akçaşehir (Karaman) region and the factors forming this structure were investigated using chemical analysis data. In the evaluations, the origin of the chemical composition of the groundwater and the control mechanisms were determined by ion ratio analysis, correlation analysis and other hydrogeochemical methods. The Akçaşehir plain is located in the northeast of Karaman province. There are many drilling wells used in groundwater supply on the plain. The foundation of the study area consists of allochthonous rocks belonging to the Bolkar Mountain Unit. Current sediments with free aquifer characteristics and limestones in the region are important aquifers containing groundwater. In the study, it was determined that 74% of the water samples were in the Mg-Ca-HCO₃/Ca-Mg-HCO₃ water facies. The most effective hydrogeochemical process forming this structure is carbonate dissociation. The Na⁺ and SO₄²⁻ increases detected in some samples are related to silicate dissociation and ion exchange processes. In general, it was determined that the water-rock interaction in the area directly affects the hydrogeochemical processes.

Keywords: Geochemical processes, Groundwater, Water chemistry, Akçaşehir (Karaman)

tanımlanması ve karakterizasyonu için de kritik öneme sahiptir [3]. Yeraltısuyunun kalitesi fiziksel, kimyasal ve biyolojik bileşenlerden etkilenir ve ayrıca besleme suyunun bileşimine, doymamış bölgedeki su-kaya-toprak etkileşimine, akiferde gerçekleşen kalış süresine ve jeokimyasal ve biyokimyasal reaksiyonlara bağlıdır [4]. Literatürde yeraltısuyunun kimyasal bileşiminin farklı faktörlerden etkilendiği belirtilmektedir [4]. Bölgesel ölçekte yeraltısuyu sistemi akifer ortamdaki meteorik suyun kimyasal özelliklerine göre değişir [5], [6] ve [7] 'ye göre, meteorik suyun kimyasal kalitesindeki değişimler jeolojik bileşenler, süzülen yağmur suyunun bileşimi, akiferin mineralojik yapısı, su-toprak-kaya etkileşiminin süresi, mineral türlerinin çözünmesi ve çökmesi ve antropojenik etki gibi faktörler tarafından belirlenir. Yeraltısuyunda çözünmüş türler arasındaki ilişkiler, çözünen maddelerin kökenini ve gözlemlenen su kimyasını üreten hidrojeokimyasal süreçleri ortaya çıkarabilir [8, 9]. Yeraltısuyunun kimyasal bileşenlerinin kökeninin

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: fatmaaksever@sdu.edu.tr (F. Aksever)

Geliş / Received: 01.08.2024 Kabul / Accepted: 30.09.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1526114

araştırılması ile akifer ortamın belirlenmesi, etkileşimde olunan kayaç ve mineral türlerinin tespiti yapılabilir [10, 11]. Bu nedenle, yeraltısuyunun hidrokimyasının karakterizasyonunda jeokimyasal ayak izinin tespiti ve bir bölgedeki su kimyasını yöneten jeokimyasal süreçlerin tanımlanması, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi çerçevesinde açık bir anlayış ve bilgi birikiminin sağlanması için büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmanın amacı, Karaman ili Akçaşehir ovası yeraltısuyunun kimyasını kontrol eden süreçleri belirlemek su-kayaç etkileşimlerini ortaya koyarak, bu süreçlerin yeraltısuyu kalitesi üzerindeki etkisini değerlendirmektir.

2 Materyal ve metot

İnceleme alanının jeolojik ve hidrojeolojik değerlendirmelerinin yapılması amacıyla Karaman N30 ve N31 paftalarında yer alan alanın 1/100.000 ölçekli jeoloji haritası önceki çalışmalardan elde edilen verilerden revize edilerek hazırlanmıştır. Hidrojeokimyasal değerlendirmelerde çalışma alanında bulunan DSİ 4. Bölge Müdürlüğü tarafından açılmış 24 adet sondaj kuyusuna ait analiz sonuçları kullanılmıştır. Piper ve Chadha diyagramları ile suların hidrojeokimyasal fasiyesleri belirlenmiştir. Gibbs diyagramı kaya-su etkileşiminin varlığının belirlenmesinde yararlanılmıştır. Suların geçirdiği hidrojeokimyasal süreçlerin (karbonat ve silikat ayrışması, iyon değişimi ve buharlaşma) tespiti için majör iyon oranları ve dağılım grafikleri kullanılmıştır. Korelasyon analizleri ile majör iyonlar ve yerinde ölçüm parametreleri arasındaki ilişkiler belirlenmiş ve bu ilişkilerin olası nedenleri açıklanmıştır.

2.1 Çalışma alanı

Çalışma alanı İç Anadolu Bölgesi'nde yer alan Konya Kapalı Havzası'nın alt havzası olan Karaman alt havzasında yer almaktadır. Oldukça geniş yayılıma sahip olan Karaman alt havzası Karaman, Ayrancı ve Akçaşehir olmak üzere 3 ayrı ovaya ayrılmaktadır. Çalışma alanı Karaman Alt Havzasının kuzeyinde bulunan Akçaşehir Ovası ve civarını kapsamaktadır. Çalışma alanı 37° 34' ve 37° 55' kuzey enlemleri ile 33° 28' ve 33° 64' doğu boylamları arasında yer almaktadır. Yaklaşık olarak 870 km²'lik bir alana sahip olan çalışma alanında rakım 1100-1200 m arasında değişmektedir. Orta Toroslar'ın kuzeybatı yamacında kalan Akçaşehir Ovası'nın en önemli yükselteleri Çakırdağ (1385m) ve Osmancık Dağları (1281m)'dir. Ovada mevsimlik akış gösteren dereler ovanın güneyinde Tavşanlıbucak ve Yolbel dereleri ile kuzeyinde İnoba ve Kel dereleridir. Çalışma alanında Akdeniz iklimi hâkimdir.

Ovada yeraltısularından çoğunlukla sulama suyu amaçlı yararlanılmaktadır. Ovada buğday başta olmak üzere tahıl, şeker pancarı, baklagiller ve meyve yetiştirilmektedir. Ovada elma yetiştiriciliği önemli bir payı almaktadır olup yaklaşık 50000 elma ağacından mevsim koşullarına bağlı olarak yıllık 25.000 ton civarında elma hasadı gerçekleştirilmektedir.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Çalışma alanının jeolojisi

Akçaşehir (Karaman) Ovası'nda temel kayaları Bolkar Dağı Birliği'ne ait allohton birimler oluşturmaktadır. Toros

Kuşağı'nın en kuzeyinde yer alan ve düşük dereceli metamorfizmaya uğramış Bolkar Dağı Birliği içinde silisli-kırıntılı ve karbonat kayaları ile temsil olunan şelf türü çökeller bulunmaktadır [12]. Birliğe ait kayalar bölgesel ölçekte yeşilist fasiyesi koşullarında metamorfizmaya uğramıştır [13].

Çalışma alanında Bolkar Dağı Birliğine ait birimler Orta Triyas-Jura yaşlı Ballıktepe formasyonu (TRJb), Kretase yaşlı Göçgediği formasyonu (Kg) ve Jura-Kretase yaşlı Meydan formasyonu (JKm)'dur [14]. Dolomit, dolomitik kireçtaşı, mermer ve rekristalize kireçtaşlarından oluşan Ballıktepe formasyonunu [15] oluşturan mermerler, genellikle rekristalize, yer yer şeker dokulu, orta-kalın katmanlı olup, yer yer masif görünüm sunar. Dolomitler mermerler ile geçişlidir. Karbonatlardan oluşan Meydan formasyonu [16], orta kalınlıkta ve belirgin tabakalı rekristalize kireçtaşları ile başlar, orta-kalın tabakalı dolomitlerle devam eder ve üstte rekristalize kireçtaşları ile son bulur. Birim yer yer çört bant ve yumru rekristalize kireçtaşları da içerir. Çörtlü kireçtaşı, rekristalize kireçtaşı ve katmanlı çörtlerden oluşan Göçgediği formasyonu [17], alta pelajik çamurtaşı, radyolaryalı çört ara bantlı, rekristalize kireçtaşları ile başlar, üste doğru çört bantlarına geçer. Bunların da üstünde çört yumru ve radyolaritli, çört ara bantlı ince-orta katmanlı, kaba taneli rekristalize kireçtaşları yer alır ve birim üstte çört ara katkılı pelajik kireçtaşları ile son bulur. Birim yaklaşık 200 m kalınlığa sahiptir [17].

Üst Miyosen-Güncel yaş aralığında çökelen neotokton örtü kayaları İnsuyu formasyonu (Tmpli) ve Kaletepe bazaltı (Tplk) ile temsil edilmektedir. Temel kayalar üzerine kırmızı, kahverenkli gölsel klastikler ile ince tabakalı kireçtaşlarından oluşan Alt Miyosen-Üst Pliyosen yaşlı İnsuyu formasyonu uyumsuz olarak gelir. İnsuyu formasyonu, alüvyal çökellerle başlar, üste doğru gölsel kırıntılarla (çakıltaşı-kumtaşı), marn ve kireçtaşı ile sonlanır [15]. Çakıltaşı; kireçtaşı, pomza volkanik cüruf, çört ve magmatik kaya parçalarından oluşur. Kumtaşları; ince taneli derecelenmeli, polijenik elemanlı, kötü boylanmalı, yer yer çapraz katmanlı ve çoğunlukla volkanik çakılıdır. Marnlar; yer yer sepiyolitik Mg²⁺ca zengin düzeyler içermektedir. Kireçtaşları orta-kalın katmanlı, bol kalsit dolgulu, mikritik ve kırılıdır. Kaletepe bazaltı sert, sıkı ve yer yer gaz boşluklu bazaltlardan oluşmaktadır [13].

Pliyosen yaşlı Divanlar formasyonu (Qed) yarı tutturulmuş, karbonatlı çamur destekli kum, kireçtaşı çakıl ve bloklarından yapılmıştır. Tapurici formasyonu (Qt) ise hareketli ve durağan kum dünlerinden oluşmaktadır. Çakıl, çakıllı kum, ince kum, silt ve kilden oluşan Hotamış formasyonu (Qho) Börücekyayla (Qhoi), Küpbasan (Qhok), İsmil (Qhoi) ve Sazlıpınar (Qhos) üyelerine ayrılmıştır. Üst Pleyistosen yaşlı çakıllı kum setlerinden oluşan Börücekyayla üyesinde kum ve çakıllar iyi boylanma ve yuvarlaklanma sunarlar [15]. Göl kıyı çökellerinden oluşan Küpbasan üyesi çapraz katmanlı kum ve çakıl içerir. Pleyistosen yaşlı İsmil üyesi yatay katmanlı çakıl, kum, kil, silt ve jipsli kumlardan oluşur. Bu üye içerisinde jips ara katmanları da bulunmaktadır. CO₃ göl tabanı çökellerinden oluşan Alt Pleyistosen yaşlı Sazlıpınar üyesinde yatay katmanlı kil, silt ve jipsli kumlar hakimdir [15]. Alüvyon

(Qal) ve Alüvyon yelpazesi (Qay) ise en genç çökellerdir. Alüvyon yelpaze, volkanik çakıllı, kireçtaşı çakıllı, kumlu, killi ve siltli oluşuklardır. Alüvyon ise tutturulmamış çakıl, kum ve siltlerden oluşmaktadır [14]; (Tablo 1; Şekil 1).

3.2 Çalışma alanının hidrojeolojisi

İnceleme alanındaki birimler akifer olabilme özellikleri açısından taneli akifer, karstik akifer ve akitard birimler şeklinde ayrılmıştır. İnceleme alanının temelini oluşturan karbonat kayaçlar karstik akifer niteliğindedir. Eriyebilen karbonat bileşimli kayaçlardan gelen suların yer aldığı karstik ortamlarda genellikle kireçtaşları ve dolomitler hakimdir. İnceleme alanında kireçtaşı, dolomit ve dolomitik kireçtaşlarından oluşan Ballıktepe ve Meydan formasyonları ile rekrystalize kireçtaşlarından oluşan Göçgediği formasyonu geçirimli özellikleri ile karstik akifer ortamları temsil etmektedir.

Akçaşehir Ovası'ndaki yeraltısuyu bulunduran en önemli ortamlar ise Pliyosen ve Kuvaterner yaşlı birimlerin oluşturduğu akiferlerdir. Bölgede geniş yayımlara sahip olan Divan, Hotamış, Tapuriçi formasyonları, Alüvyon yelpaze ve Alüvyon, içerdikleri güncel gevşek malzeme ile yeraltısuyu açısından oldukça verimli ve geçirimli birimlerdir. Bu birimler içerisindeki çakıl ve kum seviyeleri geçirimli özelliği ile yeraltısuyu açısından önemli serbest akiferi oluşturmaktadır. Çakıl, çakıllı kum, ince kum, kil ve silt seviyelerinden oluşan Hotamış formasyonu yarı geçirimli özelliğe sahip birimlerdir. Özellikle içerdiği çakıl-

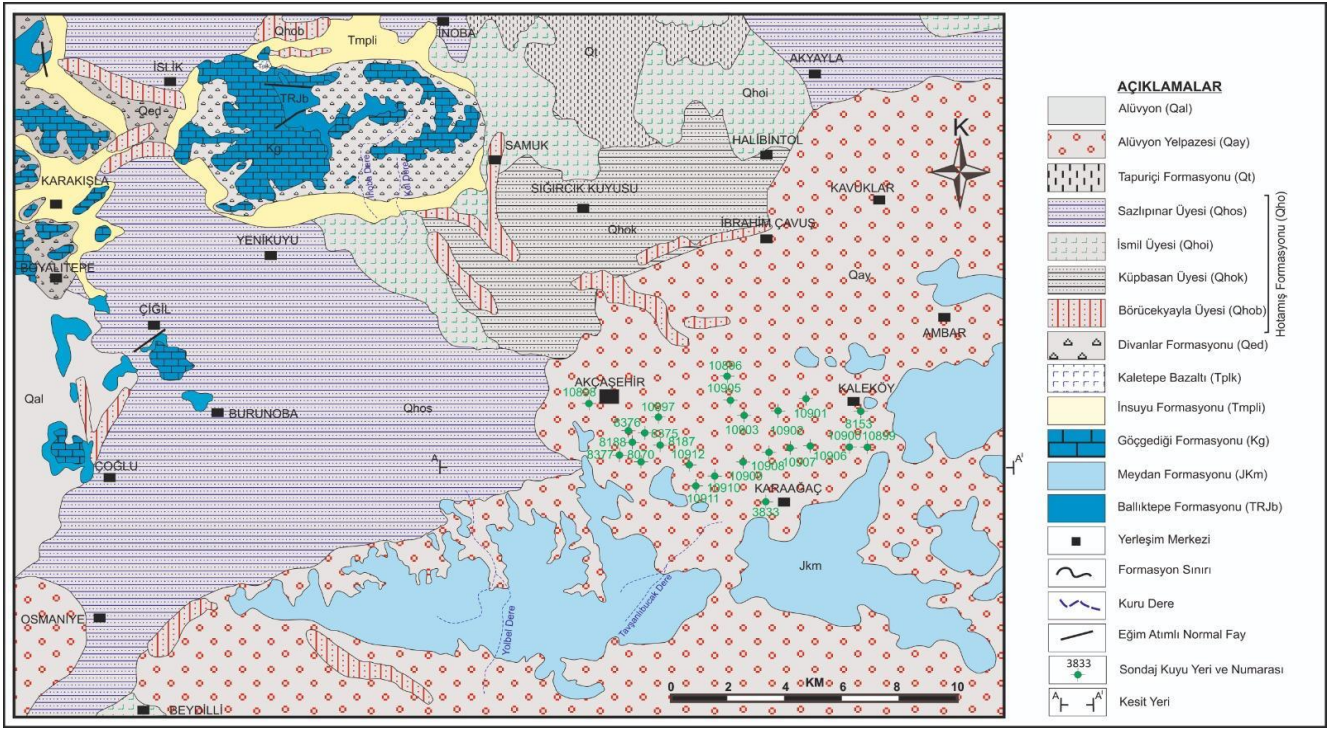
kum seviyelerine göre farklılık gösteren Hotamış formasyonu üyelerine ayrılmış ve her üye tutturulmamış malzeme özelliği ile yeraltısuyu bulundurma özelliği kazanmıştır. İnceleme alanında özellikle Hotamış formasyonuna ait Sazlıpınar üyesi üzerinde açılmış çok sayıda sondaj kuyusu yer almaktadır. Sondaj kuyularının derinlikleri 50-120 m, statik su seviyeleri ise 21-32 m arasında değişmektedir. [18].

Akçaşehir Ovası kuzeyinde açılmış olan kuyularda tamamen alüvyon birim kesilmiştir. Bu bölgede kil seviyelerinin fazla olduğu lokasyonlarda açılan sondaj kuyularından yeraltısuyu alınmamıştır. Daha güneyde açılan kuyularda ise alüvyon, çakıltaşı ve kireçtaşı birimleri kesilmiştir. Kireçtaşı birimlerinin kesildiği kuyularda daha yüksek debi değerleri elde edilmiştir (Şekil 2).

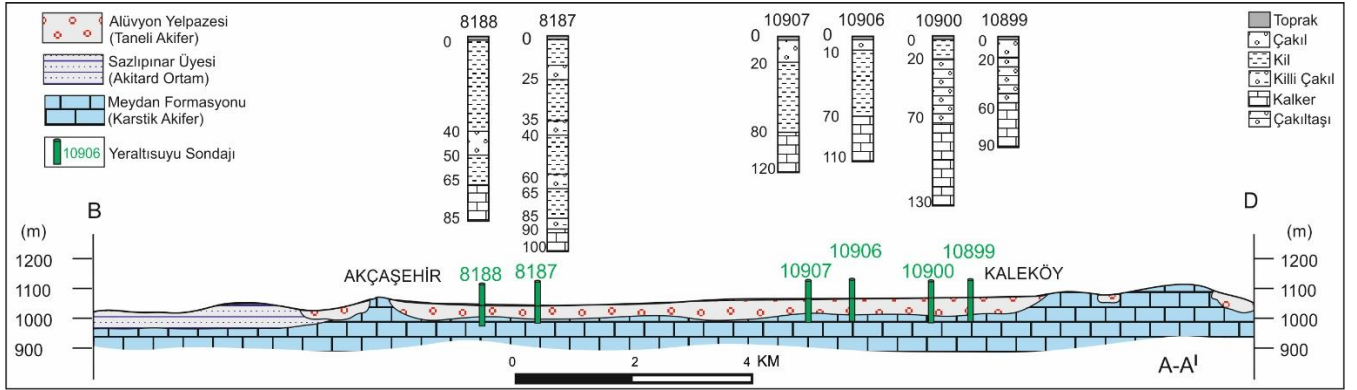
Çalışma alanındaki yarı geçirimli birimler akitard ortamı temsil etmektedir. İnceleme alanının kuzey ve kuzeybatısında yer alan ve çakıltaşı, kumtaşı, marn, kireçtaşı, tuf, tüfitden oluşan İnsuyu formasyonu ile sert, sıkı yer yer gaz boşluklu bazalt oluşan ve dar bir yayılıma sahip olan Kaletepe bazaltı yarı geçirimli özellikteki birimlerdir. İnsuyu formasyonuna ait kireçtaşı, çakıltaşı ve kumtaşı seviyeleri geçirimli özellikte iken marn seviyeleri geçirimsiz özellikte olduğundan bu birimler yarı geçirimli olarak nitelendirilmiştir. Kaletepe bazaltı da masif yapıları nedeniyle yarı geçirimli olarak nitelendirilmiştir.

Tablo 1. Çalışma alanında yayılım gösteren jeolojik birimlerin litolojik ve hidrojeolojik özellikleri

JEOKRONOLOJİ				LİTOSTRATİGRAFI			LİTOLOJİK ÖZELLİKLER	HİDROJEOLOJİK ÖZELLİKLER		
KAYA GRUBU	ÜST SİSTEM	SİSTEM	SERİ	GRUP	FORMASYON	SİMGE				
NEO-OTOKTON ÖRTÜ KAYALARI	SENOZOYİK	Kuvaterner	Holosen		Alüvyon	Qal	Tutturulmamış blok, çakıl, kum, silt	Geçirimli birim		
					Alüvyon Yelpazesi	Qay	Yarı tutturulmuş kil, silt, kum, çakıl, blok	Geçirimli birim		
					Tapuriçi Formasyonu	Qt	Hareketli ve durağan kum dünürleri	Geçirimli birim		
			Hotamış Formasyonu		Pleyistosen	Qho	Sazlıpınar üyesi	Qhos	Yatay katmanlı karbonat matrisli kil-silt, jipsli kum	Yarı Geçirimli birim
							İsmil üyesi	Qhoi	Yatay katmanlı çakıl-kum, kil-silt, jipsli kum	Yarı Geçirimli birim
							Küpbasan üyesi	Qhok	Yatay katmanlı çakıl-kum	Geçirimli birim
		Börücekyayla		Qhob			Küçük ölçek çapraz katmanlı çakıl-kum	Geçirimli birim		
		Divanlar Formasyonu	Qed	Yarı tutturulmuş, karbonatlı çamur destekli kum, çakıl, blok	Geçirimli birim					
		Pliyosen	Altı			Kaletepe Bazaltı	Tplk	Sert, sıkı yer yer gaz boşluklu bazalt	Yarı geçirimli birim	
						Miyosen	Üst		İnsuyu Formasyonu	Tmpli
TEMEL KAYALAR	MESOZOYİK	Kretase		Beşşehir-Hoyran-Hadim Napları	Bolkar Dağı Birliği	Göçgediği Formasyonu	Kg	Çörtlü kireçtaşı, kristalize kireçtaşı, çörtlü mikrit	Geçirimli birim	
						Meydan Formasyonu	JKm	Rekrystalize kireçtaşı, dolomit, dolomitik kireçtaşı yer yer çörtlü	Geçirimli birim	
						Jura	TRJb	Dolomit, dolomitik kireçtaşı, mermer, rekrystalize kireçtaşı	Geçirimli birim	
						Triyas				
Orta										



Şekil 1. İnceleme alanı jeoloji haritası ([14]'den revize edilmiştir)



Şekil 2. Hidrojeolojik enine kesit

3.3 Hidrojeokimyasal değerlendirmeler

3.3.1 Major iyon içerikleri

Çalışma alanında bulunan yeraltısularının hidrojeokimyasal özelliklerini belirleyebilmek için bölgede DSİ 4. Bölge Müdürlüğü tarafından açılan 24 adet sondaj kuyusuna ait kimyasal analiz sonuçları kullanılmıştır. Yeraltısularının fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 2'de sunulmuştur. İnceleme alanında su örneklerinin pH değerleri 7.10-8.20 arasında değişmekte olup "bazik karakterli" suları temsil etmektedir. Suların Elektriksel iletkenlik (EC) değerleri 110-920 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında değişmektedir. Kirlilik, deniz suyu girişi, sıcaklık ve kaya-su etkileşimi gibi faktörler nedeniyle sudaki iyon içeriği arttıkça EC değeri de artar [19]. En düşük EC değerinin ölçüldüğü kuyuda killi çakıl, kil ve çakıl birimlerinden yeraltısuyu alınırken, en yüksek EC değerinin ölçüldüğü 10898 nolu kuyuda çakıltaşı ve kireçtaşı biriminden su alınmaktadır. Toplam çözünmüş

madde miktarı, suda çözünmüş katyonları, anyonları, ağır metalleri ve kısmen organik maddeyi temsil eder [5]. Çalışma alanında yeraltısularının TDS değeri 54 ile 612.40 mg/l arasında değişmektedir (Tablo 2). İnceleme alanında suların sertliği 3.50 ile 51.20 Fr° arasında değişmektedir. Fransız sertlik derecesine göre suların iki adedi "çok yumuşak" diğerleri ise "az sert, sert ve çok sert" sular sınıfındadır. Ca-Mg-HCO₃, Ca-Mg sülfat ve Ca-Mg nitrat sertliği oluşturan ana bileşiklerdir.

Çalışma alanından alınan yeraltısuyu örneklerinde Na⁺ içerikleri 4.83-98.86 mg/l, K⁺ 0.78-10.17 mg/l, Ca⁺² iyonu 4.01-125.05 mg/l, Mg⁺² içerikleri ise 3.64-66.85 mg/l arasında değişmektedir. HCO₃⁻ 63.45-305.04 mg/l, SO₄⁻² 7.68-202.20 mg/l, Cl⁻ 3.55-59.56 mg/l ve CO₃⁻² içerikleri 0-14.4 mg/l arasında tespit edilmiştir.

Tablo 2. Su örneklerinin yerinde ölçüm ve analiz sonuçları

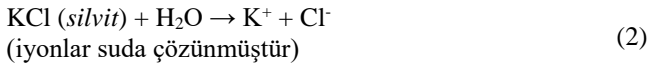
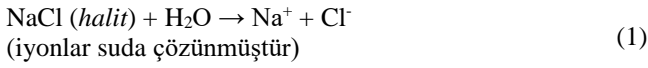
No	Kuyu/ Örnek No	pH	EC µS/cm	TDS mg/l	Sertlik Fr°	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Mg ⁺² mg/l	Ca ⁺² mg/l	CO ₃ ⁻² mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ⁻² mg/l	Su Tipi
1	3833	8.2	600	235.70	6.00	98.86	10.17	12.16	4.01	6.00	176.31	59.56	39.86	NaHCO ₃ Cl
2	8070	7.4	700	612.40	51.20	9.66	2.35	48.62	125.05	0	300.16	11.35	115.27	CaMgHCO ₃ SO ₄
3	8153	8.2	500	254.80	22.00	17.93	4.69	32.82	34.07	14.40	207.43	15.60	47.07	MgCaHCO ₃
4	8187	7.7	370	198.90	19.00	5.98	4.30	21.88	40.28	0	224.51	4.96	19.21	MgCaHCO ₃
5	8188	7.8	740	410.30	37.00	9.88	6.65	60.78	48.10	0	300.16	12.76	133.52	MgCaHCO ₃ SO ₄
6	8375	7.5	500	280.50	25.50	9.43	2.35	30.39	52.10	0	239.15	7.09	69.34	CaMgHCO ₃ SO ₄
7	8376	7.1	110	54.00	3.50	13.79	0.78	3.64	8.01	0	63.45	3.55	8.65	NaCaMgHCO ₃
8	8377	8.1	700	397.30	33.00	10.35	1.96	42.54	62.12	6.00	165.94	14.18	181.54	MgCaSO ₄ HCO ₃
9	10896	7.5	620	344.80	31.00	12.18	2.74	44.97	50.10	0	270.88	12.76	96.06	MgCaHCO ₃ SO ₄
10	10897	7.3	690	502.40	36.50	9.43	1.56	60.78	46.09	0	275.76	12.76	96.06	MgCaHCO ₃ SO ₄
11	10898	7.2	920	540.30	45.00	23.45	2.74	66.85	70.14	0	305.04	31.20	202.20	MgCaHCO ₃ SO ₄
12	10899	7.8	300	258.20	16.50	5.98	1.17	14.59	42.08	0	120.80	10.64	62.92	CaMgHCO ₃ SO ₄
13	10900	8.0	380	309.90	20.00	4.83	1.17	24.31	40.08	4.80	196.44	8.51	29.78	MgCaHCO ₃
14	10901	8.2	360	159.30	15.50	6.90	1.56	23.09	24.05	10.80	164.72	7.80	7.68	MgCaHCO ₃
15	10902	8.0	350	259.70	16.50	4.83	1.17	21.88	30.06	4.80	178.14	9.22	9.61	MgCaHCO ₃
16	10903	7.9	500	299.30	26.50	8.28	1.17	35.25	48.10	0	208.65	13.47	90.77	MgCaHCO ₃ SO ₄
17	10905	7.9	340	217.20	20.00	4.83	1.17	19.45	48.10	0	190.35	7.09	44.19	CaMgHCO ₃ SO ₄
18	10906	7.9	400	213.70	15.50	23.45	1.17	17.02	34.07	0	122.02	12.76	85.97	CaMgNaHCO ₃ SO ₄
19	10907	7.4	480	257.50	25.00	5.98	1.17	36.47	40.08	0	258.67	9.93	36.98	MgCaHCO ₃
20	10908	7.7	380	209.00	20.00	7.13	1.56	24.31	40.08	0	228.17	9.93	15.85	MgCaHCO ₃
21	10909	7.6	460	392.00	26.00	10.35	1.56	34.03	48.10	0	204.99	12.76	80.21	MgCaHCO ₃ SO ₄
22	10910	7.7	500	262.60	23.50	8.28	1.56	37.68	32.06	0	187.90	11.34	81.65	MgCaHCO ₃ SO ₄
23	10911	7.6	600	495.20	33.00	6.90	1.17	49.84	50.10	0	276.98	12.76	97.50	MgCaHCO ₃ SO ₄
24	10912	7.3	650	348.20	33.50	9.43	1.17	64.42	28.06	0	305.04	11.35	87.41	MgHCO ₃ SO ₄

Tablo 3. Korelasyon analizi

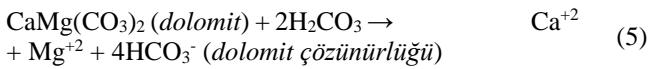
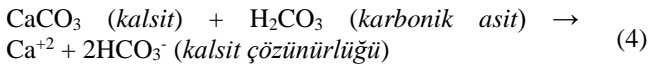
	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺²	Ca ⁺²	CO ₃ ⁻²	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	pH	EC	TDS
Na ⁺	1										
K ⁺	0.78	1.00									
Mg ⁺²	-0.21	0.00	1.00								
Ca ⁺²	-0.34	-0.18	0.50	1.00							
CO ₃ ⁻²	0.44	0.45	-0.26	-0.34	1.00						
HCO ₃ ⁻	-0.13	0.15	0.86	0.54	-0.27	1.00					
Cl ⁻	0.93	0.74	0.04	-0.17	0.40	0.08	1.00				
SO ₄ ⁻²	0.00	0.06	0.74	0.58	-0.25	0.47	0.23	1.00			
pH	0.26	0.34	-0.42	-0.27	0.72	-0.38	0.22	-0.25	1.00		
EC	0.20	0.34	0.87	0.52	-0.05	0.77	0.45	0.84	-0.20	1.00	
TDS	-0.08	0.02	0.82	0.77	-0.24	0.74	0.17	0.76	-0.32	0.83	1.00

Suların majör iyon içerikleri, pH, EC ve TDS değerleri için korelasyon analizleri yapılmıştır. Korelasyon analizi, su örneklerinde çözünmüş elementlerin kökeni ve fizikokimyasal özellikleri arasındaki ilişkileri belirlemek için kullanılabilir [20]. Yüksek bir korelasyon katsayısı (1'e yakın veya 1) iki değişken arasında iyi bir ilişki olduğu anlamına gelirken, sıfır civarındaki değer aralarında ilişki olmadığı anlamına gelir. Daha açık bir ifadeyle, $r > 0.70$ olan parametrelerin güçlü korelasyon gösterdiği, 0.50 ile 0.70 arasındaki r değerlerinin ise orta düzeyde korelasyon gösterdiği söylenebilir [21]. Majör iyonlarda Ca^{+2} - Mg^{+2} , HCO_3^- - Ca^{+2} , SO_4^{2-} - Ca ve EC- Ca^{+2} arasında ise orta pozitif korelasyon söz konusudur (Tablo 3). Yeraltısu örneklerinde Na^+ - K^+ (0.78), Mg^{+2} - HCO_3^- (0.86), Na^+ - Cl^- (0.93), Cl^- - K^+ (0.74), Mg^{+2} - SO_4^{2-} (0.74) iyonları arasında güçlü pozitif korelasyon tespit edilmiştir. EC değerleri ile Mg^{+2} , HCO_3^- , SO_4^{2-} ve TDS değeri ile Ca^{+2} , Mg^{+2} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , EC değeri arasında güçlü pozitif korelasyon belirlenmiştir.

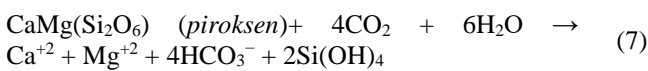
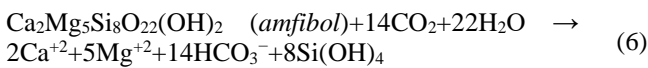
Na^+ - Cl^- , K^+ ve SO_4^{2-} arasında tespit edilen güçlü pozitif korelasyon halit (NaCl), silvit (KCl) ve jips ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) gibi evaporit minerallerinin çözünürlüğü ile ilişkilidir (Denklemler 1-3).



Akifer sistemde karbonat minerallerinin (kalsit ve dolomit) çözünmesi asidik su ile gerçekleşmektedir. Önemli karbonat aşınma reaksiyonları kalsit ve dolomitin çözünmesidir (Denklemler 4, 5).



Mg^{+2} ve HCO_3^- arasındaki pozitif korelasyon bu iki iyonunun yeraltısuunda varlığının dolomit ve dolomitik kireçtaşının çözünmesi ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Ca^{+2} ve HCO_3^- arasındaki pozitif korelasyon kireçtaşlarının yapıtaşı olarak bilinen kalsit mineralinin çözünmesi ile ilişkilidir. Bu iki iyon arasındaki pozitif korelasyon amfibol ve piroksen gibi kayaç yapıcı mafik mineraller ile kaya su etkileşimi kaynaklı da olabilmektedir (Denklemler 6, 7).



TDS'nin Mg^{+2} (0.82), Ca^{+2} (0.77), HCO_3^- (0.74) ve SO_4^{2-} (0.76) ile korelasyon katsayısı değerleri, TDS ve EC değerlerindeki artışın bu iyonlar ile ilişkili olduğunu ve bu

iyonların çözünürlüğünün birbirine bağlı olduğunu göstermektedir.

3.3.2 Hidrokimyasal bileşenlerin tanımlanması

Akifer matrisi ile yeraltısu arasındaki reaksiyonlar, suyun hidrojeokimyasal özelliklerini kontrol eder. Yeraltısuundaki toplam çözünmüş katıların önemli bir kısmını majör iyonlar oluşturur. Bu iyonların yeraltısuundaki konsantrasyonları akifer sisteminde gerçekleşen hidrojeokimyasal süreçlere bağlıdır [22]. Bu nedenle, yeraltısuundaki farklı majör iyonların konsantrasyonlarının incelenmesi, jeokimyasal süreçleri tanımlamak için kullanılır.

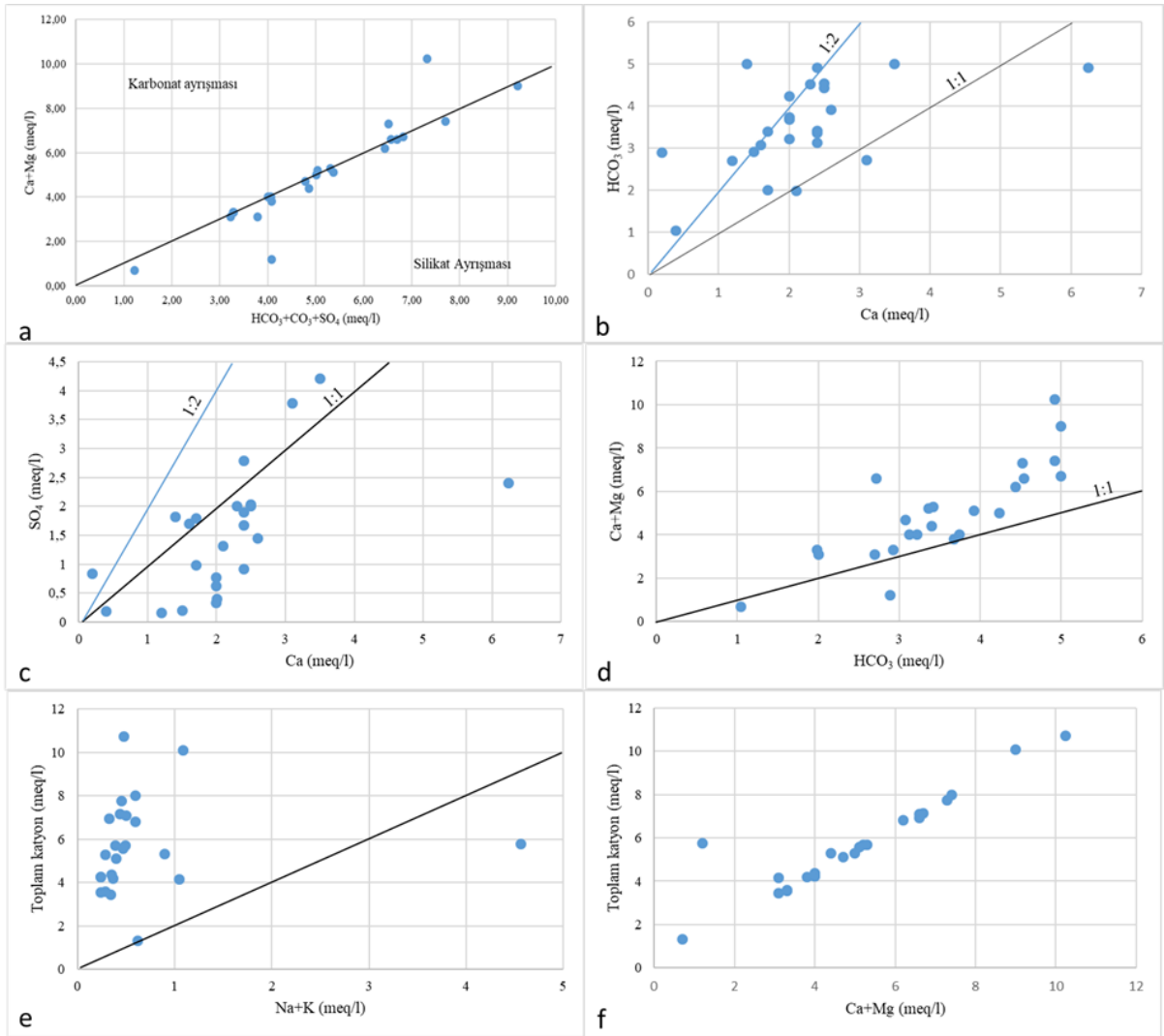
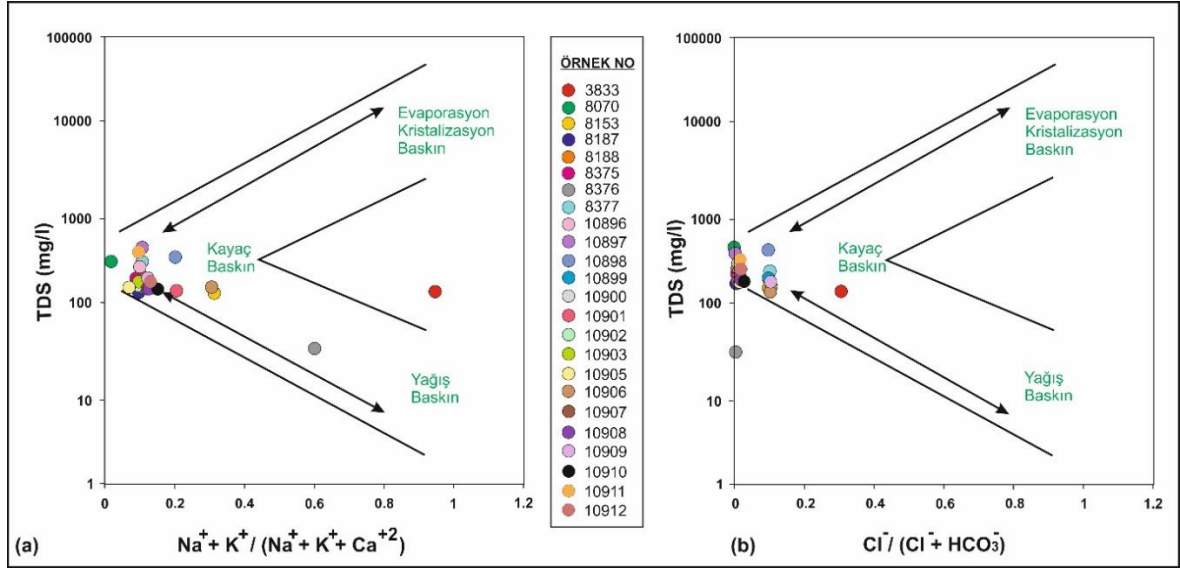
Ayrışma, iyon değişim süreçleri ve atmosferik ile antropojenik kaynaklardan gelen girdiler yeraltısuundaki kimyasal bileşenlerin içeriğini kontrol eden temel mekanizmalardır. Akifer ortamlarındaki iyonların bolluğu ve çözünürlüğüne bağlı olarak, yeraltısuundaki iyon içerikleri değişiklik gösterir. Gibbs [23] diyagramı, sudaki iyonik oranları kullanarak suyun bileşimini ve kökenini açıklamaktadır. Gibbs diyagramı, TDS'nin bir fonksiyonu olarak $Cl^-/Cl^-+HCO_3^-$ (Gibbs Oranı I = anyonlar için) ve $Na^++K^+/Na^++K^++Ca^{+2}$ (Gibbs Oranı II = kationlar için) oranını temsil eder [23], (Şekil 3). Bu diyagram, suda çözünmüş halde bulunan kimyasal bileşiklerin olası kaynaklarını tanımlar. Çalışma alanından alınan yeraltısu örnekleri Gibbs diyagramında "kayaç baskın" bölgesinde yer almakta olup, bu da yeraltısu kimyasını kontrol eden ana faktörün kaya-su etkileşimi olduğunu göstermektedir (Şekil 3).

Yeraltısuunun kimyasal yapısını kontrol eden olası hidrojeokimyasal süreçler dolaşım sırasında suyun kimyasal yapısının değişmesine neden olur. Bu süreçler ayrışma ve çözünme (karbonat çözünmesi-silikat ayrışması), iyon değişimi ve buharlaşma olarak tanımlanmaktadır.

Yeraltısuunda çözünmüş iyonların kökeni; iyonların içeriği, oranları ve bolluğu ile değerlendirilebilir. Yeraltısuunun iyon içeriklerindeki değişimler bu iyonlar arasındaki farklı oranlar ve grafikler kullanılarak yorumlanabilir ve akifer ortamındaki hidrojeokimyasal süreçler tanımlanabilir [24, 25, 26].

Minerallerin ayrışması ve çözünmesi çok sayıda çalışmada ($Ca^{+2}+Mg^{+2}$) - ($HCO_3^- + SO_4^{2-}$) grafiği ile de yorumlanmaktadır. Diyagramda yeraltısu örnekleri genel olarak 1:1 çizgisi boyunca sıralanmıştır (Şekil 4a). Bu durum yeraltısuunda bulunan majör iyonların karbonat çözünmesi ve silikat ayrışması ile evaporit minerallerinin çözünürlüğünden kaynaklandığını göstermektedir [21, 27].

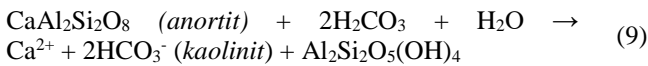
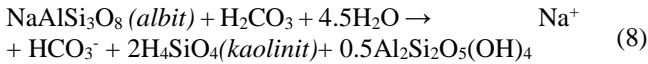
Ca^{+2}/Mg^{+2} oranı, yeraltısuunda kalsit ve dolomit çözünmesini gösterir. $Ca^{+2}/Mg^{+2} = 1$ dolomit çözünmesini, $Ca^{+2}/Mg^{+2} < 1$ kalsit çözünmesini ve $Ca^{+2}/Mg^{+2} > 2$, silikatların çözünmesini gösterir [28, 29]. Yeraltısu örneklerinin çoğunda Ca^{+2}/Mg^{+2} oranı 1'in altında bulunmuştur, bu da kalsit çözünmesini göstermektedir. Ca^{+2}/Mg^{+2} oranı 1 ile 2 arasında olan örneklerde kalsit ve dolomit çözünmesi baskındır (Tablo 4). Yeraltısu örneklerinin $Ca^{+2}/(Ca^{+2}+SO_4^{2-})$ oranı dikkate alındığında, örneklerin %75'inin değeri 0.50'den yüksektir (Tablo 4).



Bu durum yeraltısuyunda Ca⁺² derişiminde jipslerin etkisinin düşük olduğunu göstermektedir. Ca⁺² ve HCO₃⁻'in sadece kalsit çözünmesinden kaynaklandığı bölgede Ca⁺²'un HCO₃⁻'a oranı 1:2 iken, dolomit çözünmesinden kaynaklandığı bölgede 1:4'tür [30]. Ca⁺² - HCO₃⁻ dağılım diyagramına göre (Şekil 4b), tüm yeraltısuyu örnekleri (sadece 2 örnek hariç) 1:1 çizgisinin üzerindedir ve bu da kalsit çözünmesinin baskın olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, yeraltısuyundaki kalsiyum ve sülfat jips veya anhidritin çözünmesinden kaynaklanıyorsa, Ca⁺²/SO₄⁻² oranı 1 civarındadır [31]. Ca⁺²-SO₄⁻² dağılım diyagramında (Şekil 4c), birkaç örnek 1:1 eşitliği boyunca düşer ve çoğu sülfattan fazla kalsiyum gösterir. 1:1 eşitliğini takip eden yeraltısuyu örnekleri jips veya anhidrit çözünmesinden etkilenmiş olduğunu gösterir. Benzer şekilde, kalsiyumdan fazla sülfat bulunması, kalsiyumun muhtemelen kalsit çökmesi yoluyla sistemden uzaklaştırıldığını ifade etmektedir [30].

Yeraltısuyunun Ca⁺²+Mg⁺²/HCO₃⁻ oranı su-kayaç etkileşimi hakkında bilgi sağlayabilir. Bu oranın 1'den büyük değerleri karbonat çözünmesinin baskın olduğunu gösterirken, 1'den küçük değerleri silikat ayrışmasına işaret eder [32, 33]. İki örnek hariç çalışma alanından alınan su örneklerinin Ca⁺²+Mg⁺²/HCO₃⁻ oranı 1'den büyük olup Ca⁺²+Mg⁺²/HCO₃⁻ grafiğinde noktalar 1:1 çizgisinin üstündedir (Şekil 4d). Bu durum Ca⁺², Mg⁺² ve HCO₃⁻ kaynaklarının karbonat kökenli olduğunu ve karbonat çözünmesinin baskınlığını göstermektedir.

Silikat ayrışması, özellikle kristalen kaya akiferlerinde yeraltısuyunun ana iyon kimyasını kontrol eden jeokimyasal süreçlerden biridir [34]. Silikat ayrışması Na+K ve toplam katyon arasındaki oran tahmin edilerek anlaşılabilir. İnceleme alanında Na+K ve toplam katyon arasındaki ilişkide (Şekil 4e) örneklerin çoğunun 1:2 çizgisinin yakınında ve üstünde olduğu görülmektedir. Bu durum, çalışma alanındaki sodyum ve potasyum iyonlarının artışında silikat ayrışmasının etkin olduğunu göstermektedir. Silikat aşınmasının su kimyası üzerindeki etkisi öncelikle katyonların ve silikanın eklenmesidir. Tipik silikat aşınma reaksiyonları ve ilişkili yan ürünler aşağıda açıklanmıştır (Denklemler 8, 9).



Ayrıca, Ca⁺²+Mg⁺² ile toplam katyon grafiği (Şekil 4f) örneklerin 1:1 çizgisi üzerinde ve çok yakın dağılım göstermektedir. Bu durum karbonat çözünümünün ana proses olduğunu göstermektedir. İkincil olarak evaporitlerin çözünümü ve iyon değişimi söz konusudur. Ayrıca, silikat ayrışmasının da katkısı bulunmaktadır.

Akifer sistemindeki en yaygın iyon değiştiriciler kil mineralleridir. İyon değişim süreci kloro-alkali indeks (CAI-I=[Cl-(K+Na)]/Cl, CAI-II=[Cl-(K+Na)]/(CO₃+HCO₃+SO₄) değerleri ile açıklanmaktadır [35, 36, 37]. Kloro-alkali indeksleri, kayadaki Mg⁺² ve Ca⁺² iyonları ile sudaki K⁺ ve Na⁺ iyonlarının değişimi olduğunda pozitifdir. Bu durum ters

iyon değişimini gösterir. Kloro-alkali indeksleri negatifse, akiferdeki Na⁺ ve K⁺, sudaki Ca⁺² ve Mg⁺² ile yer değiştirerek iyon değişimi olayını gösterir [38]. Negatif değerler kloroalkalin dengesizliğini gösterir ve bu reaksiyon katyon-anyon değişim reaksiyonu olarak bilinir. Çalışma alanındaki su örneklerinin hesaplanan CAI-I ve CAI-II indeksleri genellikle negatif (Tablo 4) olup bölgede "iyon değişiminin" baskın olduğunu göstermektedir. Başka bir deyişle, yeraltısuyundaki Ca⁺² ve Mg⁺² akifer matrisindeki Na⁺ ve K⁺ ile değişim gerçekleşmektedir [30, 39].

Na/Cl oranı, yeraltısuyundaki buharlaşma sürecini tanımlamak için kullanılabilir. Buharlaşma, yeraltısuyu sisteminde gözlemlenebilen bir olgudur. İnceleme alanında yeraltısularının Na⁺/Cl⁻ oranları genellikle 1'den büyüktür (Tablo 4). Na/Cl oranının 1 civarında veya üzerinde olması, sodyumun iyon değişimi süreçleriyle ilgili silikat ayrışmasından (Na-plajiolklas veya ortoklaz) kaynaklandığını gösterir [40, 41, 42]. İyon değişimi sonucunda kil minerallerindeki Na⁺ iyonları bölgedeki yeraltısularında Ca⁺² iyonları ile yer değiştirmektedir.

Tablo 4. Korelasyon analizi

Ca ²⁺ /Mg ²⁺	Ca ²⁺ /SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺ /HCO ₃ ⁻	Na ⁺ /Cl ⁻	Ca/Ca+SO ₄ ²⁻	CAI-I	CAI-II
0.20	0.24	0.07	2.56	0.19	-1.71	-0.71
1.56	2.60	1.27	1.31	0.72	-0.50	-0.02
0.63	1.73	0.50	1.77	0.63	-1.05	-0.09
1.12	5.03	0.55	1.86	0.83	-1.64	-0.06
0.48	0.86	0.49	1.19	0.46	-0.67	-0.03
1.04	1.79	0.66	2.05	0.64	-1.35	-0.05
1.33	2.22	0.38	6.00	0.69	-5.20	-0.43
0.89	0.82	1.14	1.13	0.45	-0.25	-0.01
0.68	1.25	0.56	1.47	0.56	-0.67	-0.04
0.46	1.15	0.51	1.14	0.53	-0.25	-0.01
0.64	0.83	0.70	1.16	0.45	-0.24	-0.02
1.75	1.60	1.06	0.87	0.62	0.03	0.00
1.00	3.23	0.62	0.88	0.76	0.00	0.00
0.63	7.50	0.44	1.36	0.88	-0.55	-0.04
0.83	7.50	0.51	0.81	0.88	0.08	0.01
0.83	1.27	0.70	0.95	0.56	-0.03	0.00
1.50	2.61	0.77	1.05	0.72	-0.20	-0.01
1.21	0.95	0.85	2.83	0.49	-1.92	-0.18
0.67	2.60	0.47	0.93	0.72	-0.04	0.00
1.00	6.06	0.53	1.11	0.86	-0.25	-0.02
0.86	1.44	0.71	1.25	0.59	-0.36	-0.03
0.52	0.94	0.52	1.13	0.48	-0.25	-0.02
0.61	1.23	0.55	0.83	0.55	0.08	0.00
0.26	0.77	0.28	1.28	0.43	-0.38	-0.02

3.3.3 Suların sınıflandırılması

Piper [43] ve Chadha [44] diyagramları suların sınıflamasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu diyagramlarda suların hidrojeokimyasal fasiyesleri tespit edilebilmektedir. İlk olarak [45] tarafından hidrolojik sistemlerde suyun kimyasal karakteri hidrojeokimyasal fasiyes kavramı ile belirlenmiştir. Hidrojeokimyasal fasiyes, kayaların içindeki mineraller ile yeraltısuyu arasında meydana gelen hidrojeokimyasal süreçlerin etkilerini yansıtmaktadır [46].

Piper diyagramında çalışma alanındaki suların genel olarak üç ayrı fasiyese ayrılacağı belirlenmiştir (Şekil 5). Yeraltısuyu örneklerinin büyük bir çoğunluğu Mg-Ca-HCO₃-SO₄ fasiyesindedir. Diğer baskın su sınıfı ise Mg-Ca-HCO₃/Ca-Mg-HCO₃'dir. Ayrıca, birer örnekte Na-HCO₃, Na-Ca-HCO₃ ve Ca-Mg-Na-HCO₃-SO₄ su sınıfı gözlenmiştir. Piper diyagramından uyarlanan Chadha

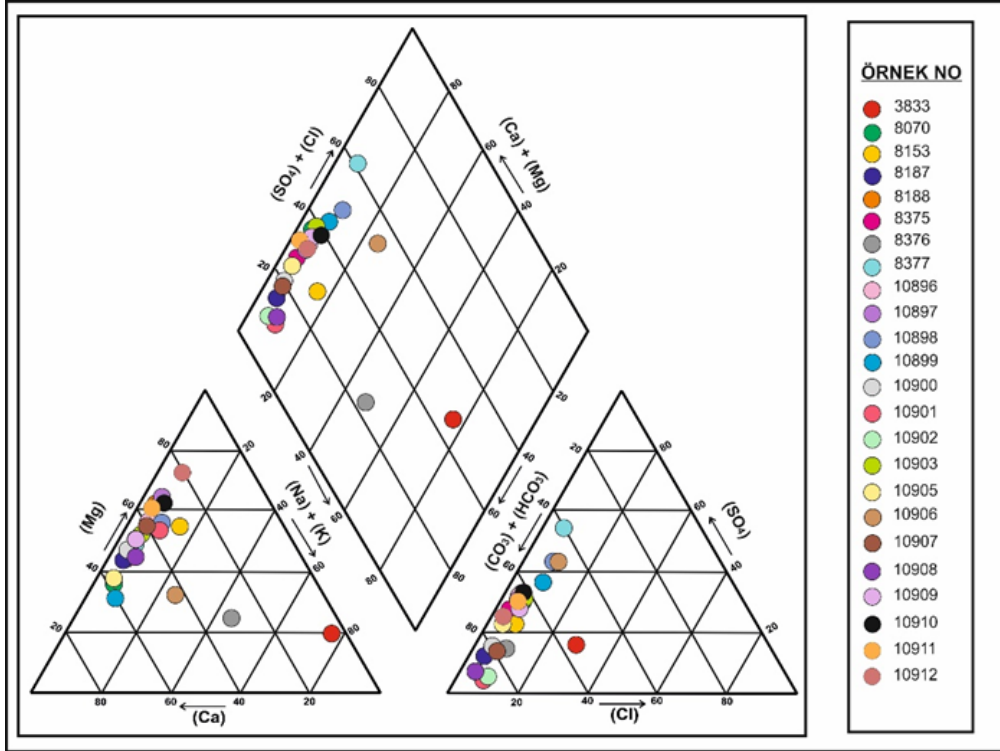
diyagramında su örneklerinin %74'ünün Ca-Mg-HCO₃ sınıfında olduğu görülmektedir (Şekil 6, Tablo 5).

İnceleme alanında sondaj kuyuları alüvyon yelpazesinde açılmıştır. Alüvyon yelpazesinde açılan kuyularda tabanda Meydan formasyonuna girilmiştir [18]. Meydan formasyonu kireçtaşı ve dolomit litolojilerinden oluşmaktadır. Sularda yüksek Ca²⁺, Mg²⁺ ve HCO₃⁻ içeriği kireçtaşı ve dolomit varlığı ile ilişkili kaya-su etkileşimi kaynaklıdır.

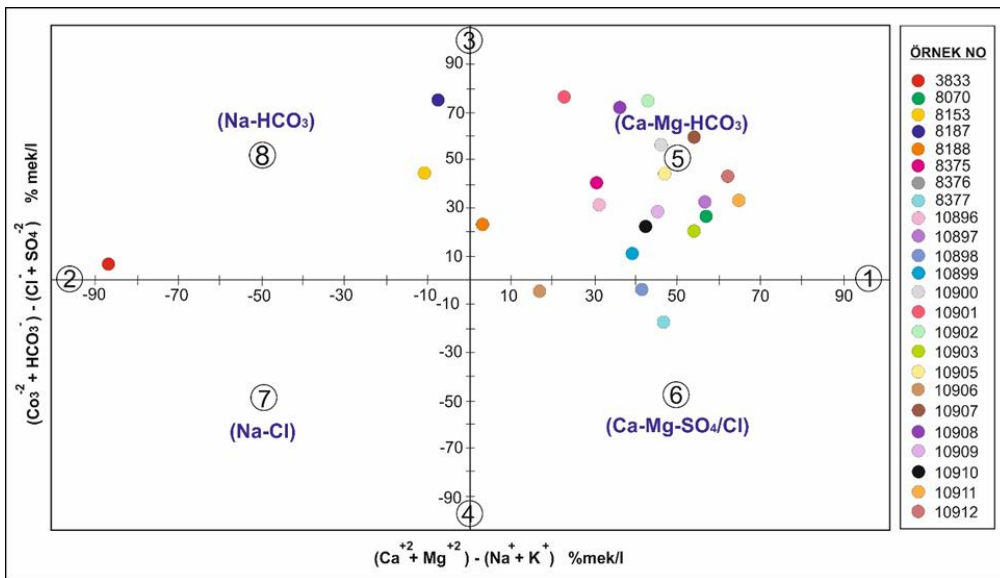
Su örneklerinin yaklaşık %13'si Na-HCO₃ su sınıfındadır. Bu fasiyes toprak alkali metallerin yerini alkali

metallerin almasıyla oluşur. İnceleme alanında yeraltılarında genel olarak sodyum varlığı Na-montmorillonit kilinin sudaki kalsiyum ve magnezyum ile reaksiyona girerek sodyum açığa çıkardığı reaksiyonlar gibi doğal iyon değişiminden kaynaklanmaktadır.

Chadha diyagramında su örneklerinin kalan yaklaşık %13'si Ca-Mg-SO₄ fasiyesindedir. Sularda SO₄²⁻ artışı bölgede geniş alanlarda yüzeyleyen Hotamış formasyonuna Sazlıpınar ve İsmil üyeleri içerisinde bulunan jips mineralleri kaynaklıdır.



Şekil 5. Piper diyagramı



Şekil 6. Chadha diyagramı

Tablo 5. İnceleme alanında yeraltısuyunun hidrojeokimyasal değerlendirilmesi

Su Tipi	Litoloji	Mineral	Hidrojeokimyasal Süreç	Dağılım
Ca-Mg-HCO ₃ / Mg-Ca-HCO ₃	Alüvyal sediment-kireçtaşı, dolomit	Kalsit (CaCO ₃) Dolomit (CaMg(CO ₃) ₂)	Karbonat çözünümü	Örneklerin %74'ü
Na-HCO ₃	Alüvyal sediment, kil, silt, kum, evaporit mineralleri	Albit (NaAlSi ₃ O ₈) Halit (NaCl)	Silikat ayrışması İyon değişimi	Örneklerin %13'ü
Ca-Mg-SO ₄	Alüvyal sediment, kil, silt, kum, evaporit mineralleri	Jips (CaSO ₄ 2H ₂ O) Amfibol (Ca ₂ Mg ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂) Piroksen (CaMg(Si ₂ O ₆))	Evaporit mineral çözünümü Silikat ayrışması	Örneklerin %13'ü

4 Sonuçlar

Akçaşehir Ovası Karaman ilinin kuzeydoğusunda bulunmaktadır. Ovada tutturulmamış kil, silt, kum, çakıl malzemeden oluşan alüvyon yelpaze üzerinde açılmış çok sayıda sondaj kuyusu bulunmaktadır. 50-120 m arasındaki derinliklerde açılan bu kuyuların tabanında kireçtaşı birimine girilmiştir. Bu kireçtaşları alüvyon yelpaze biriminin güneyi ve doğusunda geniş alanlarda yüzeyleyen Meydan formasyonuna aittir. Bu formasyon rekristalize kireçtaşı, dolomit, dolomitik kireçtaşı ile yer yer çörtlü seviyelerden oluşmaktadır.

Bu çalışmada Akçaşehir ovasında açılmış sondaj kuyularından alınan su örneklerinin kimyasal analiz sonuçları kullanılarak yeraltısuyunun kimyasal bileşiminin kaynağı ve kontrol mekanizmaları; iyon oranları, korelasyon analizi ve diğer hidrojeokimyasal yöntemlerle değerlendirilmiştir. İnceleme alanında yeraltısularında tespit edilen baskın su tipi Mg-Ca-HCO₃/Ca-Mg-HCO₃ olarak belirlenmiştir. İnceleme alanında alüvyon birim, alüvyal sedimentler, kireçtaşı ve dolomit birimleri ile ilişkili olan yeraltısularında bu sınıfı gözlenmiştir. Değerlendirmelerde bu su tipinin gelişmesinde kireçtaşı ve dolomitik kayaçların varlığı ile ilişkili olarak kalsit ve dolomit minerallerinin çözünmesinin etkin olduğu görülmektedir. İnceleme alanında bazı örneklerde SO₄²⁻ ve Na⁺ iyonlarındaki artışa bağlı olarak Na-HCO₃ ve Ca-Mg-SO₄ fasiyeslerinin varlığı tespit edilmiştir. Yeraltısularında tespit edilen SO₄²⁻ ve Na⁺ artışı suların etkileşim halinde olduğu Kuvaterner birimler içerisinde bulunan jipsli kum ve jips seviyeleri ile ilişkilidir.

Majör iyonlardan Na⁺ ile K⁺, Mg²⁺ ile HCO₃⁻, Na⁺ ile Cl⁻ ve K⁺, Mg²⁺ ile SO₄²⁻ arasında güçlü pozitif korelasyon tespit edilmiştir. Ayrıca, EC değerleri ile Mg²⁺, HCO₃⁻, SO₄²⁻ ve TDS değeri ile Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻, SO₄²⁻, EC değeri arasında güçlü pozitif korelasyon belirlenmiştir. Bu korelasyonlar akifer ortamda bulunan mineral ve kayaç türlerine bağlı olarak su fasiyesinin gelişimine neden olan su-kayaç etkileşimi süreçlerinin varlığını desteklemektedir.

Yeraltısularında analiz edilen majör iyon içeriklerine bağlı olarak farklı iyon oranlarına (Ca²⁺/Mg²⁺, Ca²⁺/(Ca²⁺+SO₄²⁻), Ca²⁺/SO₄²⁻, Ca²⁺+Mg²⁺/HCO₃⁻, Ca²⁺/HCO₃⁻, Na/Cl) göre değerlendirmeler yapılmıştır. Bu değerlendirmelerde de su tipleri ve korelasyon analizi ile tespit edilen benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Farklı yöntemlerle belirlenen hidrojeokimyasal değerlendirmeler çalışma alanında yeraltısuyu kimyasının su-kayaç etkileşimi süreçleri ile denetlendiğini göstermiştir. İnceleme alanındaki yeraltısuyu kimyası başta karbonatların çözünümü/ayrışması

olmak üzere evaporitlerin çözünümü, iyon değişimi ve silikatların ayrışması ile kontrol edilmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 12

Kaynaklar

- [1] J. Liu, K. Lou, Z. Gao, M. Tan, Hydrochemical insights on the signatures and genesis of water resources in a high-altitude city on the Qinghai-Xizang Plateau, South-west China. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 18(7), 88, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11783-024-1848-8>
- [2] R.M. Kurakalva, G. Kuna, S.P. Vaiphei, S.S: Guddeti. Evaluation of hydrogeochemical profile, potential health risk and groundwater quality in rapidly growing urban region of Hyderabad, South India. *Environmental Earth Sciences*, 80(10), 383, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09661-z>
- [3] L. Surinaidu, Role of hydrogeochemical process in increasing groundwater salinity in the central Godavari delta. *Hydrology Research*, 47 (2), 373–389, 2016. <https://doi.org/10.2166/nh.2015.050>
- [4] C.A.J. Appelo, D. Postma, *Geochemistry, groundwater and pollution*, 2nd edn. A.A. Balkema, Rotterdam, 1999.
- [5] J.D. Hem, *The study and interpretation of the chemical characteristics of natural water*, 3rd edn. USGS Water Supply Paper 2254, US Geological Survey, 1989.
- [6] A.W. Hounslow. *Water quality data analysis and interpretation*. Lewis Publishers, 1995.
- [7] L. Andre, M. Franceschi, P. Pouchan, O. Atteia, Using geochemical data and modeling to enhance the understanding of groundwater flow in a regional deep aquifer, Aquitaine Basin, south-west of France. *Journal of Hydrology*, 305, 40–62, 2005. <https://doi.org/10.16/j.jhydrol.2004.08.027>
- [8] M. Jalali, Assessment of the chemical components of Famenin groundwater, western Iran. *Environmental Geochemistry and Health*, 29, 357–374, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10653-006-9080-y>
- [9] A.K. Singh, G.C. Mondal, S. Kumar, T.B. Singh, B.K. Tewary, A. Sinha, Major ion chemistry, weathering processes and water quality assessment in upper catchment of Damodar river basin. *India Environmental Geology*, 54, 745–758, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0860-1>

- [10] B.M. Shakya, T. Nakamura, S.D. Shrestha, K. Nishida, Identifying the deep groundwater recharge processes in an intermountain basin using the hydrogeochemical and water isotope characteristics. *Hydrology Research*, 50(5), 1216–1229, 2019. <https://doi.org/10.2166/nh.2019.164>
- [11] C.K. Tay, Hydrogeochemical framework of groundwater within the Asutifi-North District of the Brong-Ahafo Region, Ghana. *Applied Water Science*, 11(4), 72, 2021. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01398-1>
- [12] N. Özgül, Toros'ların bazı temel özellikleri. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 19(1), 65-78, 1976.
- [13] T. Bilgiç, 1/100000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları Karaman-N31, No:129, MTA Genel Müdürlüğü Jeoloji Etütleri Dairesi, 2009. Ankara.
- [14] Ü. Ulu, A.K. Bulduk, E. Ekmekçi, M. Karakaş, H. Öcal, A. Arbas, L. Saçlı, Taşkiran, M.A. Adır, M. Sözeri, Ş. Karabıyıkoglu, M. İnlice-Akkise ve Cihanbeyli-Karapınar alanının jeolojisi. *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Rapor no: 9720*, s. 219, 1994.
- [15] Ü. Ulu, V. Balcı, 1:100 000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları Karaman-N30 Paftası. No: 128, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi, 2009.
- [16] M.A. Gül. Ö. Çuhadar, Y. Öztaş, H. Aklan, T. Efeçinar, Bolkar Dağı- Beledemik yöresinin jeolojisi ve petrol olanakları,. TPAO arama Grubu Dökümantasyon Merkezi, 159s, 1984.
- [17] M. Şenel, H. Selçuk, Z.R. Bilgin, M.A. Şen, T. Karaman, M.A. Dinçer, E. Durukan, A. Arbas, S. Örcen, C. Bilgi, Çameli (Denizli), Yeşilova (Burdur), Elmalı (Antalya) ve dolayının jeolojisi, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Rapor no: 9429, s. 344, 1989.
- [18] DSİ, Karaman-Ayrancı ve Akçşehir Ovaları Hidrojeolojik Etüt Raporu. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Yayını, 1975.
- [19] A. Şahinci, Doğal Suların Jeokimyası, Reform Matbaası, 546, 1991.
- [20] F.H. Azaza, M. Ketata, R. Bouhlila, M. Gueddari, L. Riberio, Hydrogeochemical characteristics and assessment of drinking water quality in Zeuss–Koutine aquifer, southeastern Tunisia. *Environmental Monitoring Assessment*, 174, 283–298, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1457-9>.
- [21] M. Kumar, A.L. Ramanathan, M.S. Rao, B. Kumar, Identification and evaluation of hydrogeochemical processes in the groundwater environment of Delhi, India. *Environmental Geology*, 50(7), 1025-1039, 2006. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0275-4>
- [22] E. Lakshmanan, R. Kannan, M. Senthil-Kumar, Major ion chemistry and identification of hydrogeochemical processes of groundwater in a part of Kancheepuram district, Tamil Nadu, India. *Environmental Geosciences*, 1(4), 157-166, 2003. <https://doi.org/10.1306/eg100403011>
- [23] R.J. Gibbs, Mechanism controlling world water chemistry. *Science*, 170, 795-840, 1970.
- [24] N. Aghazadeh, A.A. Mogaddam, Investigation of hydrochemical characteristics of groundwater in the Harzandat aquifer, Northwest of Iran. *Environmental Monitoring Assessment*, 176, 183–195, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1575-4>
- [25] A. Davraz, A. Özdemir, Groundwater quality assessment and its suitability in Çeltikçi plain (Burdur/Turkey). *Environmental Earth Science*, 72, 1167–1190, 2014. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-3036-1>
- [26] A. Davraz, B. Batur, Hydrogeochemistry characteristics of groundwater and health risk assessment in Yalvaç–Gelendost basin (Turkey). *Applied Water Science*, 11(4), 67, 2021. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01401-9>
- [27] S. Kuldip, H.S. Hundal, S. Dhanwinder, Geochemistry and Assessment of Hydrogeochemical Processes in Groundwater in the Southern Part of Bathinda District of Punjab, Northwest India. *Environmental Earth Science*, 64, 1823-1833, 2011. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-0989-9>.
- [28] A.L. Mayo, M.D. Loucks, Solute and isotopic geochemistry and groundwater flow in the Central Wasatch Range, Utah. *Journal of Hydrology*, 172, 31–59, 1995. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02748-E](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02748-E)
- [29] R. Rajesh, K. Brindha, R. Murugan, L. Elango, Influence of hydro-geochemical processes on temporal changes in groundwater quality in a part of Nalgonda district, Andhra Pradesh, India. *Environmental Earth Science*, 65, 1203-1213, 2011. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1368-2>
- [30] T. Subramani, N. Rajmohan, L. Elango, Groundwater geochemistry and identification of hydrogeochemical processes in a hard rock region, Southern India. *Environmental Monitoring Assessment*, 162, 123-137, 2010. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0781-4>.
- [31] B.K. Das, P. Kaur, Major ion chemistry of Renuka lake and weathering processes, Sirmour district, Himachal Pradesh, India. *Environmental Geology*, 40, 908-917, 2001. <https://doi.org/10.1007/s002540100268>
- [32] A. Kumar Singh, G.C. Mondal, T.B. Singh, S. Singh, B.K. Tewary, A. Sinha, Hydrogeochemical processes and quality assessment of groundwater in Dumka and Jamtara districts, Jharkhand, India. *Environmental Earth Science*, 67, 2175-2191, 2012. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1658-3>.
- [33] K. Pazand, A. Hezarkhani, Y. Ghanbari, N. Aghavali, Geochemical and quality assessment of groundwater of Marand Basin, East Azarbaijan Province, northwestern Iran. *Environmental Earth Science*, 67, 1131–1143, 2012. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1557-7>.
- [34] N. Rajmohan, L. Elango, Identification and evolution of hydrogeochemical processes in the groundwater environment in an area of the Palar and Cheyyar river basins, Southern India. *Environmental Geology*, 46,

- 47-61, 2004. <https://doi.org/10.1007/s00254-004-1012-5>
- [35] S.K. Tyagi, P.S. Datta, N.K. Pruthi, Hydrochemical appraisal of groundwater and its suitability in the intensive agricultural area of Muzaffarnagar district, Uttar Pradesh, India. *Environmental Geology*, 56, 5, 901-912, 2009. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1190-7>.
- [36] H. Schoeller, Qualitative evaluation of groundwater resources. In *Methods and techniques of groundwater investigation and development*. Water Research, Series-33 (pp. 44-52) Paris: UNESCO, 1967.
- [37] H. Schoeller, *Geochemistry of groundwater in Groundwater studies-An International guide for research and practice* Paris UNESCO, Chap 15:1-18, 1977.
- [38] F.K. Zaidi, Y. Nazzal, M.K. Jafri, M. Naeem, I. Ahmed, Reverse ion exchange as a major process controlling the groundwater chemistry in an arid environment: a case study from northwestern Saudi Arabia. *Environmental Monitoring Assessment*, 187, 607, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4828-4>
- [39] F.K. Zaidi, A. Salman, S. Hag-Elsafi, H.J. Alfaifi, Assessment of hydrological processes operating in a multi-layered sedimentary aquifer system in Saudi Arabia using integrated chemical and statistical approach. *Environmental monitoring and assessment*, 191, 1-18, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7597-7>
- [40] M. Mayback, Global Chemical Weathering of Surficial Rocks Estimated from River-Dissolved Loads., *American Journal of Science*, 287, 401-428, 1987.
- [41] M.G. Garcia, M. Hidalgo, M.A. Blesa, Geochemistry of groundwater in the alluvial plain of Tucumán province, Argentina. *Hydrogeology Journal*, 9, 597-610, 2001. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0166-4>.
- [42] C.K. Tay, Hydrochemistry of groundwater in the Savelugu-Nanton District, Northern Ghana. *Environmental Earth Science*, 67, 2077-2087, 2012. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1647-6>
- [43] A.M. Piper, A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water Analyses. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 25, 914-923, 1944. <https://doi.org/10.1029/TR025i006p00914>
- [44] D.K. Chadha, A proposed new diagram for geochemical classification of natural waters and interpretation of chemical data. *Hydrogeology Journal*, 7, 431-439, 1999. <https://doi.org/10.1007/s100400050216>
- [45] W. Back, Hydrochemical Facies and Ground-Water Flow Patterns in Northern Part of Atlantic Coastal Plain, 498-A, 1-42, 1966.
- [46] P.J. Sajil Kumar, Interpretation of groundwater chemistry using piper and chadha's diagrams: a comparative study from perambalur taluk. *Elixir Geoscience*, 54, 12208-12211, 2013.





Prediction of polarization curves of PEMFC membrane electrode assembly using artificial intelligence technics

Yapay zeka teknikleriyle PEMFC membran elektrot yapısının polarizasyon eğrilerinin tahmini

Haydar Bayar^{1,*} , Erkan Dursun² 

¹ Yıldız Technical University, Department of Marine Engineering, 34349, İstanbul, Türkiye

² Marmara University, Department of Electrical and Electronics Engineering, 34854, İstanbul, Türkiye

Abstract

Proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) are used commercially in automobiles, buses, uninterruptible power supplies, and combined heat power systems, holding a significant place in the fuel cell market. Fuel cell performance is characterized by polarization curves in design and manufacturing processes. This study predicts a PEMFC's polarization curves using comparative artificial intelligence (AI) models trained and tested under different operational conditions. The AI model inputs are cell temperature, humidity, anode-cathode flow, and membrane resistance. The outputs are cell voltage and current density. The model outputs are compared with experimental values for 50°C, 100% humidity using MATLAB software. The average Root Mean Square Error (RMSE) for the ANFIS prediction is 0.056112, while for the ANN prediction it is 0.011919. These results indicate that the Artificial Neural Network (ANN) method outperforms the Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) in predicting the behavior of the PEMFC's Membrane Electrode Assembly (MEA). The models showed promising results with high accuracy.

Keywords: Artificial intelligence, Electrochemical devices, Energy conversion, Fuel cells

1 Introduction

PEMFCs, compared with other types of fuel cells, have the highest energy density and the fastest start-up time [1]. The PEMFC is electrochemically complex and has a nonlinear nature [2]. This complex structure complicates the commercialization of hydrogen fuel cells. According to the U.S. Department of Energy (DOE)'s report, market drivers for PEMFCs include the need for methods to reduce the time and costs of final fuel cell stack tests in manufacturing [3]. Current final testing processes take a long time due to expensive equipment, limited floor space, and gas preparation [4-5]. Fuel cell modeling can lead to improvements in fuel cell design, making them more cost-effective and efficient. The model must be robust, accurate, and provide solutions for fuel cell issues.

Comparative studies of ANN and ANFIS are used to address the nonlinear statistical and complex structures of

Öz

Proton değişim membranlı yakıt hücreleri (PEMFC) otomobiller, otobüsler, kesintisiz güç kaynakları ve kombine ısı güç sistemlerinde ticari olarak kullanılmaktadır ve yakıt hücresi pazarında önemli bir yere sahiptir. Yakıt hücresi performansı, tasarım ve üretim süreçlerinde polarizasyon eğrileri ile karakterize edilir. Bu çalışma, farklı çalışma koşullarında eğitilip test edilen karşılaştırmalı yapay zeka (AI) modelleri kullanarak bir PEMFC'nin polarizasyon eğrilerini tahmin etmektedir. AI model girdileri hücre sıcaklığı, nem, anot-katot akışı ve membran direncidir. Çıktılar ise hücre voltajı ve akım yoğunluğudur. Model çıktıları, MATLAB yazılımı kullanılarak 50°C, %100 nem koşullarındaki deneysel değerlerle karşılaştırılmıştır. ANFIS tahmini için hataların ortalama karekökü (RMSE) 0.056112 iken, ANN tahmini için 0.011919'dur. Bu sonuçlar, Yapay Sinir Ağı (ANN) yönteminin, PEMFC'nin Membran Elektrot Yapısının (MEA) davranışını tahmin etmede Uyarlamalı Nöro Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) yönteminden daha iyi performans gösterdiğini göstermektedir. Modeller yüksek doğrulukla umut verici sonuçlar vermiştir.

Anahtar kelimeler: Yapay zeka, Elektrokimyasal cihazlar, Enerji Dönüşümü, Yakıt hücreleri

PEMFCs [6-9]. Inputs for the PEMFC model include anode and cathode flow, cell resistance, temperature, and humidity, with the output being the polarization curve. Neuro-Adaptive and Neural-Network Learning systems have been studied extensively [6-9]. This paper is organized into the following sections: Section II explains PEMFC dynamics. Section III describes the experimental setup and polarization curves of the MEAs under different conditions. Section IV explains the ANFIS architecture and performance. Section V details the ANN architecture and presents both experimental and predicted polarization curves. The final section presents conclusions.

2 PEMFC dynamics

Fuel cells are electrochemical devices that are environmentally friendly and have high energy density. Therefore, they are used as alternative power systems. Due to the complex and dynamic structures of fuel cells,

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: hbayar@yildiz.edu.tr (H. Bayar)

Geliş / Received: 20.08.2024 Kabul / Accepted: 01.10.2024 Yayımlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1536258

designing and developing them is a challenging process. Figure 1 illustrates the complexity of the PEMFC system.

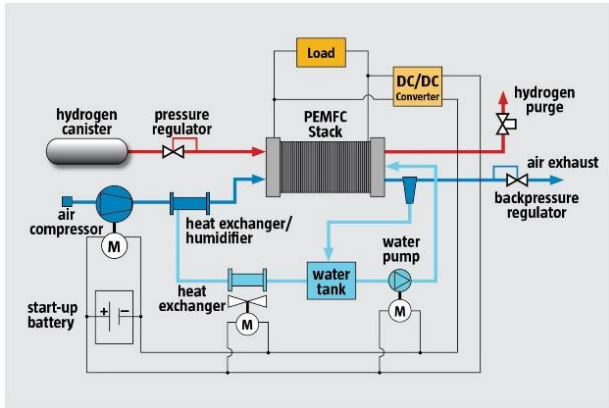


Figure 1. Working diagram of PEMFC system [10]

The key component of a PEMFC is the membrane electrode assembly (MEA), which comprises a Nafion® membrane sandwiched between electrodes, gas diffusion layers, and catalyst layers. Electrodes are typically made of woven carbon paper or cloth. The PEMFC catalyst layer is in direct contact with both sides of the membrane and consists of Pt nanoparticles supported on micron-sized carbon particles. Each gas diffusion layer (GDL) surrounds the catalyst layers and is made of carbon fibers coated with Polytetrafluoroethylene (PTFE) to impart hydrophobic properties, thereby reducing the formation of water droplets that could hinder gas diffusion to the catalyst [11-15]. All the chemical reactions in the PEMFC occur within the MEA [16]. Figure 2 illustrates the MEA structure.

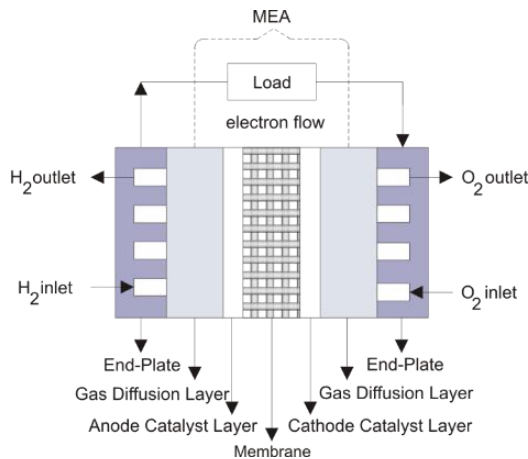


Figure 2. Membrane electrode assembly (MEA)

The complexity of the electrochemical reactions within the PEMFC's MEA contributes to the challenges of its commercialization and testing. While the single cell voltage is 1.229V, various performance losses, including activation, ohmic, and mass transport losses, lead to a decrease in overall cell voltage.

The performance of PEMFCs can be assessed and characterized using polarization curves [17-20]. These curves are essential for understanding the efficiency and

operational characteristics of Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs). A polarization curve plots the cell voltage against the current density, revealing the various types of losses or overpotentials encountered during operation (Figure 3). These losses include activation losses, ohmic losses, and concentration losses. Activation losses stem from the kinetics of electrochemical reactions, notably the sluggish oxygen reduction reaction at the cathode. Ohmic losses result from resistance to ion flow in the electrolyte and electron flow within the cell components. Concentration losses, or mass transport losses, occur when reactants are not supplied adequately to the reaction sites, leading to a voltage drop at higher current densities. Each type of loss dominates different regions of the polarization curve: activation losses prevail at low current densities, ohmic losses in the mid-range, and concentration losses become significant at high current densities [21]. Analyzing these curves enables researchers to diagnose performance issues and refine design and material choices for PEMFCs, thereby improving their efficiency and operational longevity [22].

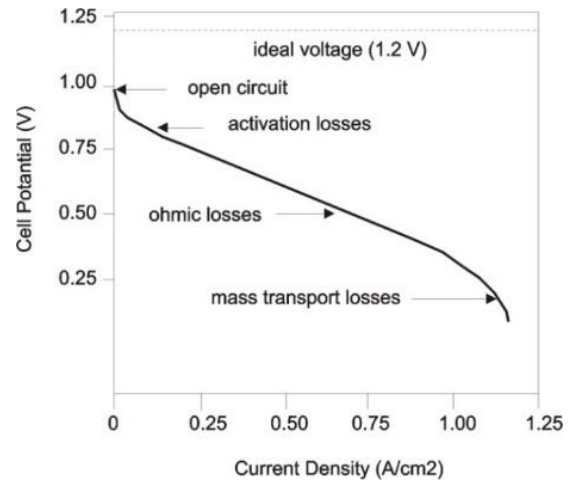


Figure 3. Polarization curve of the PEMFC

3 Experimentation of PEMFC's MEA

PEMFC's MEA is tested via Teledyne Medusa® Fuel Cell Testing System (Figure 4). PEMFC's polarization curves represent the steady-state performance achieved after 5 minutes of operation (Figure 5). Nafion® 212 is used as an electrolyte.



Figure 4. The PEMFC's MEA testing system

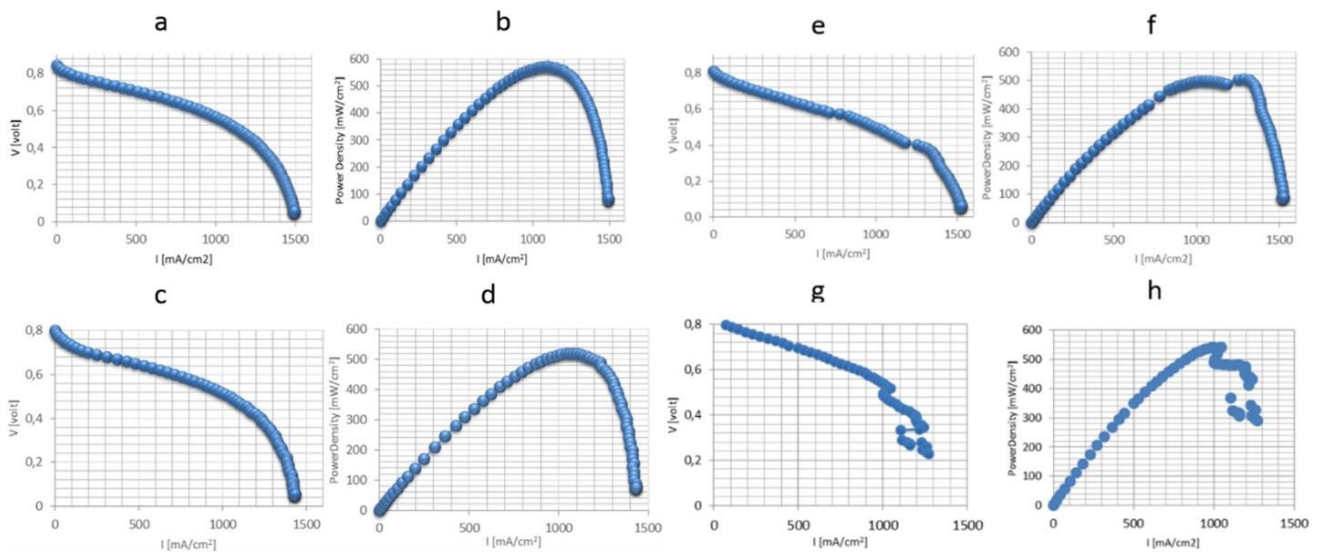


Figure 5. The polarization curves of PEMFC's MEA at different conditions. (a) Cell voltage vs. current at 50 °C temperature and 100% humidity. (b) Power density vs. current at 50 °C temperature and 100% humidity. (c) Cell voltage vs. current at 50 °C temperature and 75% humidity. (d) Power density vs. current at 50 °C temperature and 75% humidity. (e) Cell voltage vs. current at 80 °C temperature and 75% humidity. (f) Power density vs. current at 80 °C temperature and 75% humidity. (g) Cell voltage vs. current at 80 °C temperature and 100% humidity. (h) Power density vs. current at 80 °C temperature and 100% humidity

The reactions in a fuel cell occur at the anode and cathode catalyst plates on either side of the membrane. The overall reaction is similar to a combustion process, which is exothermic, releasing energy and water. This heat (enthalpy) generated from the reaction represents the difference in formation temperatures between the products and reactants. At room temperature (25°C), the reaction that produces liquid water releases an energy of $\Delta H = -286 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, known as the Higher Heating Value (HHV). However, not all of this enthalpy energy is converted into electrical energy; some is lost due to various factors. The portion of energy that is converted into electrical energy is represented by Gibbs free energy (ΔG) (Table 1).

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (1)$$

where H is enthalpy, T is absolute temperature, and S is entropy.

Table 1. Enthalpies, entropies and Gibbs free energy of H₂/O₂ fuel cell reaction in (kJ/mol.K) and the resulting theoretical cell potential at 25°C ([23])

	ΔH (kJ/mol)	ΔG (kJ/mol)	ΔS (kJ/mol.K)	E (Volt)
H ₂ + 1/2O ₂ → H ₂ O (liquid)	-285.8	-237.1	-0.163	1.23
H ₂ + 1/2O ₂ → H ₂ O (gas)	-241.8	-228.6	-0.045	1.18

4 Architecture of proposed ANFIS model

ANFIS is formed by integrating adaptive neural networks and fuzzy logic rules, providing an effective model for nonlinear system modeling. The fuzzification layer matches the inputs according to fuzzy rules based on membership

functions. Figure 6 shows the Fuzzy Inference System (FIS). All rules are evaluated on parallel surfaces in the fuzzy logic framework (fuzzification). The results of these rules are then combined and filtered (defuzzification). Adaptive networks often use supervised learning algorithms during the learning stage. These networks have several adaptive nodes directly connected to each other [21-22].

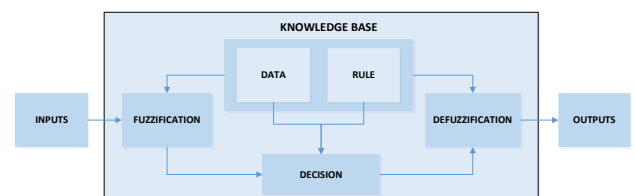


Figure 6. Fuzzy inference system (FIS)

The ANFIS consists of five layers: fuzzification, rule, normalization, defuzzification, and summation neuron layers [24]. ANFIS integrates fuzzy learning and artificial neural networks, employing different types of models. The two most commonly used types are Mamdani and Takagi-Sugeno. The basic formulation for a two-input (x, y) and one-output (f) model is as follows [24-26]. The structure of the Takagi-Sugeno-Kang ANFIS type is depicted in Figure 7.

Rule: if x is A₁ and y is B₁, then

$$f_1 = p_1 x + q_1 y + r_1 \quad (2)$$

Rule: if x is A₂ and y is B₂, then

$$f_2 = p_2 x + q_2 y + r_2 \quad (3)$$

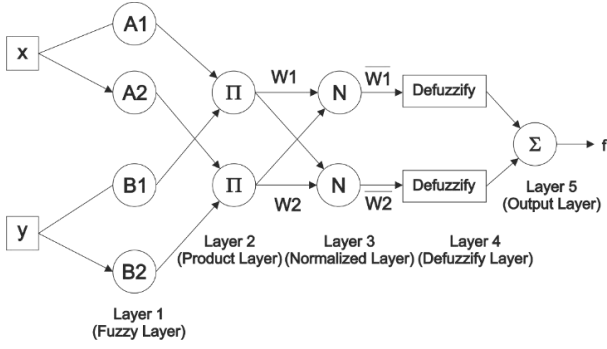


Figure 7. Structure of Takagi Sugeno-Kang ANFIS type

The Takagi Sugeno-Kang ANFIS type consisting inputs x and y , two rules and one output. Every node i in the layer 1 is a square node with a node function.

$$O_i^1 = \mu A_i(x) \quad (4)$$

where x is the input to node i , and A_i is the linguistic label. O_i^1 is the membership function of A_i .

$$\mu A_i(x) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right] b_i} \quad (5)$$

a_i, b_i, c_i are the parameter set [27-28].

In ANFIS, the Gaussian membership function was used for the input variables. There are 243 rules in the system. The learning rate used during the training process of the model is 0.05. The number of epochs is 50, and the error tolerance is 10^{-5} . The model has 5 layers.

Input Layer (Layer 1): This is the layer where the input variables (anode flow, cathode flow, resistance of the cell, cell temperature, humidity) are placed.

Membership Function Layer (Layer 2): This is the layer where the input variables are fuzzified and their membership degrees are calculated.

Rule Layer (Layer 3): This is the layer where the firing strengths of the rules are calculated based on the membership degrees.

Normalization Layer (Layer 4): This is the layer where the values from the rule layer are normalized and combined.

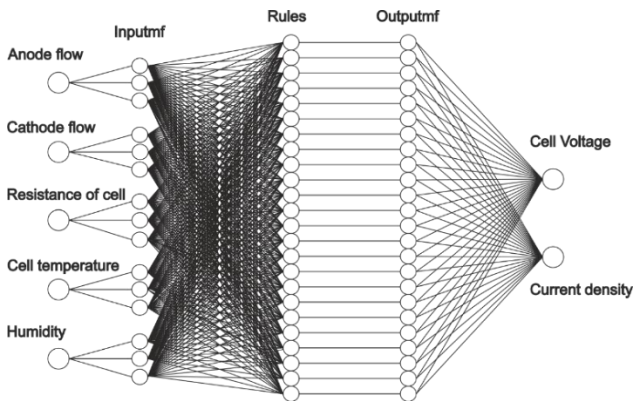


Figure 8. The ANFIS model structure

Output Layer (Layer 5): This is the layer where the outputs of the rules are calculated and the final outputs of the system (cell voltage and current density) are produced. (Figure 8). The use of two sigmoid functions in output layer yielded the best results and was implemented in this study.

Back propagation learning and least mean square estimation are utilized in the ANFIS model to determine the parameters, with the procedure iterated for optimization. The data set obtained at 100% humidity and 80 °C is used to predict the voltage of PEMFC's MEA (Figure 9). Experimental data for PEMFC's MEA at 75% humidity and 50 °C serves as the ANFIS training data set (Figure 10). An average root mean square error (RMSE) of 0.056112 is achieved by the 40th epoch.

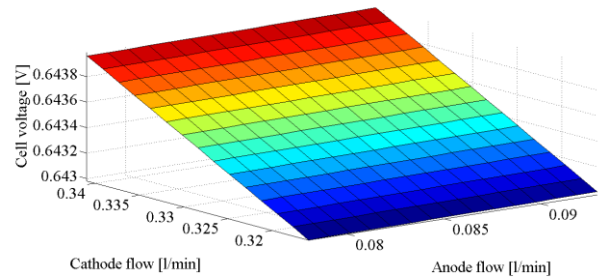


Figure 9. The cell voltage curve depends on anode-cathode flow

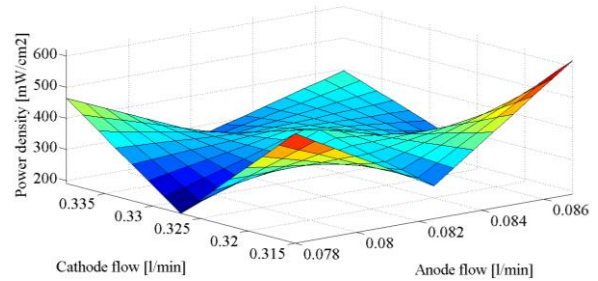


Figure 10. The power density curve of depends on anode-cathode flow

5 Architecture of proposed ANN model

ANN is a model that mimics the layered and parallel structure of the brain, which is composed of nerve cells. Like the brain, ANN can generate new information through learning. The ANN model is a powerful and reliable tool for modeling nonlinear systems. It consists of three primary network types: single-layer feedforward networks, multi-layer perceptron (MLP) feedforward networks, and recurrent networks [29]. The ANN structure used in this study includes 5 inputs, 20 hidden neurons, and 2 outputs Dataset split into 75% training, 15% validation, and 15% test. The Sigmoid activation function was used in the hidden layers and the output layer. The Learning Rate was set to 0.0005, Batch Size to 64, and the number of Epochs to 50. The number of epochs is determined based on the complexity of the model, the size of the dataset, and the learning speed of the model. The ANN network is depicted in Figure 11.

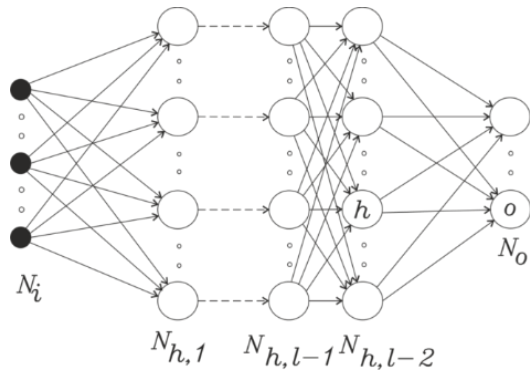


Figure 11. The multi-layer ANN network with l layers of units

The functioning of an ANN involves several key steps: forward propagation, loss calculation, backpropagation, and iterative training. Initially, input data is fed into the input layer, where each neuron's output is computed as a weighted sum of its inputs and then passed through an activation function. This process continues through each layer until the data reaches the output layer, producing the final prediction. The network then compares this prediction to the actual target values using a loss function, which quantifies the error. During backpropagation, the network adjusts the weights of the connections between neurons by computing the gradient of the loss function with respect to each weight and updating the weights to minimize the error. This iterative process, carried out over multiple training epochs, gradually reduces the error, enhancing the network's ability to learn underlying patterns in the data [30].

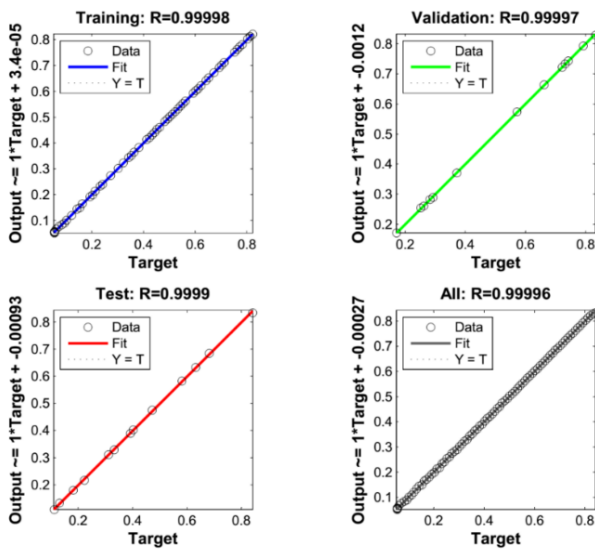


Figure 12. ANN Regression analysis

In this study, the relationship between ANN training, validation and test data and output values was examined by regression analysis. The perfect fit for regression plots should fall along a 45-degree line. In this study, the regression analysis showed remarkable results for all data sets. R-value for each case is 0.9999 (Figure 12).

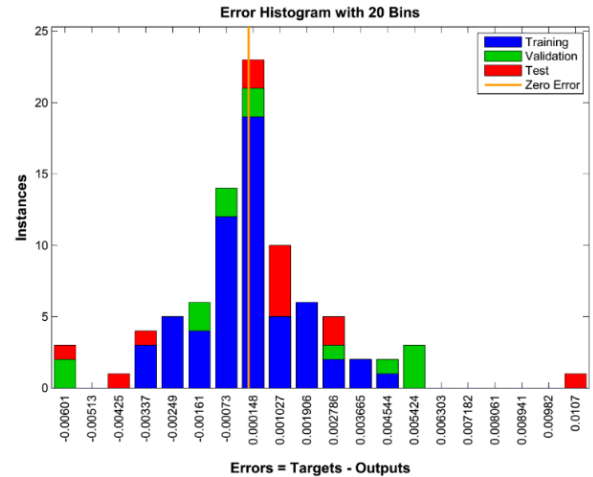


Figure 13. Error histogram for ANN model

The obtained error histogram validates the performance of the ANN network. The blue bars represent the training data set, the green bars represent the validation data set, and the red bars represent the testing data set. Most errors fall between -0.00513 and 0.006303 in the error histogram (Figure 13).

6 Conclusions

By using AI techniques such as ANFIS and ANN, the cost and time involved in the design of PEMFCs can be reduced. Unlike physical models, fuel-cell performance curves are generated with fewer variables. This study proposes ANFIS and ANN models for predicting the polarization curve of PEMFC's MEA. The prediction performance of the ANFIS and ANN models is evaluated using RMSE.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_i - p_i)^2} \quad (6)$$

a_i , actual values

p_i , predicted values

The average RMSE for the ANFIS prediction is 0.056112 and the ANN prediction is 0.011919.

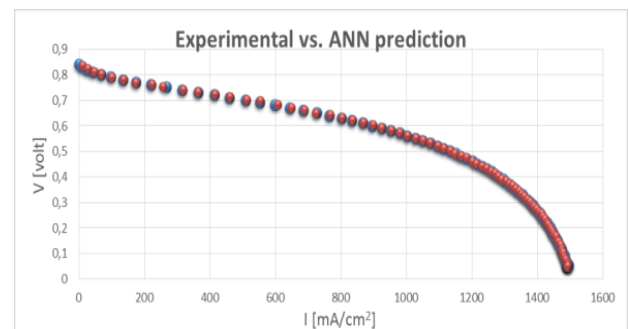


Figure 14. ANN prediction vs. experimental results

In Figure 14 and Figure 15, the red dots represent the predicted values, while the blue dots represent the experimental values.

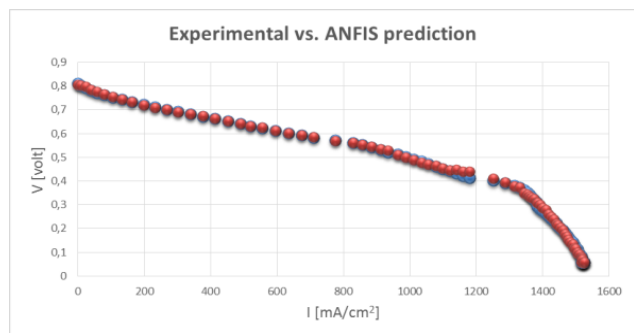


Figure 15. ANFIS prediction vs. experimental results

The existing literature frequently highlights the advantages of ANFIS in environments where interpretability and the ability to manage non-linear and uncertain data are crucial. ANFIS's integration of fuzzy logic with neural networks enables it to effectively capture complex relationships within data, providing a level of transparency through interpretable fuzzy rules. However, despite these strengths, this study demonstrates that ANN, which is relatively simpler to implement and scale, can yield more effective results in predicting complex systems like fuel cell polarization curves.

Acknowledgement

The datasets used in this study were obtained from the laboratory that was part of UNIDO-ICHET (United Nations Industrial Development Organization- The International Centre for Hydrogen Energy Technologies). We would like to express our gratitude to Prof. Mehmet Süha Yazıcı and Gülşah Yegen Özalp for their invaluable assistance. Despite the fact that UNIDO-ICHET is currently non-operational, it has provided invaluable support to numerous academic studies on hydrogen. On this occasion, we honour the memory of Prof. Nejat Veziroğlu, the founding director of UNIDO-ICHET, with gratitude and respect.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): %16

References

- [1] V. Lakshminarayanan and P. Karthikeyan, Performance enhancement of interdigitated flow channel of PEMFC by scaling up study. *Energy Sources Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42 (14), 1785–1796, 2019. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1604889>.
- [2] M. Wei, S. J. Smith and M. D. Sohn, Experience curve development and cost reduction disaggregation for fuel cell markets in Japan and the US. *Applied Energy*, 191, 346-357, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.056>.
- [3] U.S. Department of Energy, 2019 Annual Progress Report, DOE Hydrogen and Fuel Cells Program. https://www.hydrogen.energy.gov/library/annual-progress/annual_progress19, Accessed 10 January 2024.
- [4] X. Lü, Y. Qu, Y. Wang, C. Qin and G. Liu, A comprehensive review on hybrid power system for PEMFC-HEV: Issues and strategies. *Energy Conversion and Management*, 171, 1273-1291, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.065>.
- [5] L. James and D. Andrew, *Fuel Cell Systems Explained*. Wiley, New York, 2003.
- [6] C. Spiegel, *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using MATLAB*. Academic Press, 2008.
- [7] Z. Li, S. Jemei, R. Gouriveau, D. Hissel and N. Zerhouni, Remaining useful life estimation for PEMFC in dynamic operating conditions. *Proceedings of IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pp. 1-6, Hangzhou, China, 2016.
- [8] Y. Vural, D. B. Ingham, and M. Pourkashanian, Performance prediction of a proton exchange membrane fuel cell using the ANFIS model. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34 (22), 9181-9187, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.08.096>.
- [9] M. Seyhan, Y. E. Akansu, M. Murat, Y. Korkmaz, and S. O. Akansu, Performance prediction of PEM fuel cell with wavy serpentine flow channel by using artificial neural network. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42 (40), 25619-25629, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.001>.
- [10] M. Mehrpooya, B. Ghorbani, B. Jafari, M. Aghbashlo and M. Pouriman, Modeling of a single cell micro proton exchange membrane fuel cell by a new hybrid neural network method. *Thermal Science and Engineering Progress*, 7, 8-19, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.04.012>.
- [11] X. Wu, X. Zhu, G. Cao and H. Tu, Nonlinear modeling of a SOFC stack based on ANFIS identification. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 16 (4), 399-409, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2008.01.004>.
- [12] F. Barbir, *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*. Academic Press, 2005.
- [13] Q. Li, W. Chen, Y. Wang, J. Jia and M. Han, Nonlinear robust control of proton exchange membrane fuel cell by state feedback exact linearization. *Journal of Power Sources*, 194 (1), 338-348, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.04.077>.
- [14] D. Zhou, F. Gao, E. Breaz, A. Ravey, A. Miraoui and K. Zhang, Dynamic phenomena coupling analysis and modeling of proton exchange membrane fuel cells. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 31 (4), 1399-1412, 2016. <https://doi.org/10.1109/TEC.2016.2587162>.
- [15] D. Yu and S. Yuvarajan, A novel circuit model for PEM fuel cells. *Proceedings of Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pp. 362-366, Anaheim, CA, USA, 2004.
- [16] J. Jia, Y. Wang, M. Han and Y.T. Cham, Dynamic characteristic study of proton exchange membrane fuel cell. *Proceedings of IEEE Sustainable Energy Technologies*, pp. 24-27 Singapore, 2008.

- [17] G. S. Avcioglu, B. Ficicilar and I. Eroglu, Effect of PTFE nanoparticles in catalyst layer with high Pt loading on PEM fuel cell performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(23), 10010-10020, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.048>.
- [18] N. M. Zahari and A. A. Aziz, Effect of platinum catalyst loading on membrane electrode assembly (MEA) in proton exchange membrane fuel cell (PEMFC). 10th IEEE Int. Conf. Semiconductor Electronics (ICSE), pp. 669-673, Kuala Lumpur, Malaysia, 19-21 September 2012.
- [19] Y. Wang, K. S. Chen, J. Mishler, S. C. Cho and X. C. Adroher, A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research. *Applied Energy*, Volume 88(4), 981-1007, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.09.030>.
- [20] C. Wang, M. H. Nehrir and S. R. Shaw, Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(2), 442-451, 2005, <https://doi.org/10.1109/TEC.2004.842357>.
- [21] D. Zhou, Y. Wu, F. Gao, E. Breaz, A. Ravey and A. Miraoui, Degradation prediction of PEM fuel cell stack based on multi-physical aging model with particle filter approach. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp. 1-8, Portland, USA, 02-06 October 2016.
- [22] E. Dursun, G. Y. Ozalp and O. Kilic, Experimental Analysis and Electrical Modeling of PEM Fuel Cell's MEA. *International Review Of Electrical Engineering-Iree Part:A*, 5, 1595-1599, 2010.
- [23] L. Khotseng, Fuel Cell Thermodynamics. in: P. Vizureanu, (Eds.), *Thermodynamics and Energy Engineering*, IntechOpen, pp. 1-17, 2019.
- [24] A. H. Abdulwahid and S. Wang, A new protection approach for microgrid based upon combined ANFIS with Symmetrical Components. 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), pp. 1984-1989, Xi'an, China, 2016.
- [25] S. Wayan and M.A. Kemal, *Modeling of Tropospheric Delays Using ANFIS*. Springer, Switzerland, 2016.
- [26] B. B. Jovanovic, I. S. Reljin and B. D. Reljin, Modified ANFIS architecture - improving efficiency of ANFIS technique. 7th Seminar on Neural Network Applications in Electrical Engineering, pp. 215-220 Belgrade, Serbia, 2004.
- [27] M Sugeno and G.T Kang, Structure identification of fuzzy model. *Fuzzy Sets and Systems*, 28(1), 15-33, 1988, [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(88\)90113-3](https://doi.org/10.1016/0165-0114(88)90113-3).
- [28] M. Alakhras, M. Oussalah and M. Hussein, ANFIS: General description for modeling dynamic objects. *IEEE/ACS 12th International Conference of Computer Systems and Applications (AICCSA)*, pp. 1-8, Marrakech, Morocco, 2015.
- [29] J.S.R. Jang, Input selection for ANFIS Learning. *IEEE Int. Conf. Fuzzy Systems*, pp. 1493-1499, New Orleans, LA, USA, 1996.
- [30] S. Sumathi and S. Paneerselvam, *Computational intelligence paradigms: theory and applications using MATLAB*. CRC Press, Florida, 2010.





Proteogenomic profiling of lung adenocarcinoma reveals therapeutic targets for precision medicine

Akciğer adenokarsinomunun proteogenomik analizi: hassas tıp için terapötik hedeflerin belirlenmesi

Abdulkadir Elmas^{1,*} 

¹ Giresun University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Giresun 28200, Türkiye

¹ Icahn School of Medicine at Mount Sinai, Department of Genetics and Genomic Sciences, New York, NY 10029, USA

Abstract

Lung cancer is the top cause of cancer-related fatalities worldwide, impacting both men and women. A major challenge is its frequent diagnosis at advanced stages, which limits treatment options. While genomic and transcriptomic analyses have traditionally been used to identify potential drug targets, there remains an unexplored potential in targeting protein-level anomalies. This study systematically investigates the proteomic landscape of 109 primary lung adenocarcinoma (LUAD) tumors using comprehensive mass-spectrometry (MS) proteomics data. By focusing on kinases, the key actors in oncogenic signaling pathways, we aim to find new therapeutic targets for LUAD. Through intricate analyses encompassing tumor-normal differentials and inter-tumor variations, our study identifies notable overexpressed targets, including PLAU, MET, ERBB2, EGFR, PDK1 kinases, and THBS2, CRABP2, INPP4B proteins, many of which present no evidence of transcriptomic alteration. Several targets we identified through proposed approaches have corresponding inhibitor drugs, including ERBB2 kinase (Afatinib) and VEGF-A protein (Bevacizumab). Our findings validate known therapeutic markers in lung cancer and reveal candidate protein targets specific to LUAD, underscoring the efficacy of proteomic methodologies in advancing precision medicine for cancer.

Keywords: Weighted k-nearest neighbor (KNN) algorithm, Lung adenocarcinoma (LUAD), Proteomics, Targeted therapy, Precision oncology

1 Introduction

Lung cancer remains the foremost cause of cancer-related mortality globally, affecting both men and alike [1]. The high mortality rate is largely attributable to the disease's tendency to be diagnosed at an advanced stage, often limiting the efficacy of conventional treatment options. Recent advances in cancer research emphasize the need for novel therapeutic strategies that can address this challenge by targeting

Öz

Akciğer kanseri, dünya genelinde kanserle ilişkili ölümlerin başlıca nedeni olup, hem erkekleri hem de kadınları etkilemektedir. En büyük zorluklardan biri, genellikle hastalığın ileri evrelerinde teşhis edilmesidir; bu da tedavi seçeneklerini kısıtlamaktadır. Genomik ve transkriptomik analizler geleneksel olarak potansiyel ilaç hedeflerini belirlemede kullanılmıştır; ancak protein düzeyindeki anormallikleri hedeflemekte henüz keşfedilmemiş bir potansiyel bulunmaktadır. Bu çalışma, 109 birincil akciğer adenokarsinomu (LUAD) tümörünün proteomik profilini kapsamlı kütle spektrometrisi (MS) verileri kullanarak sistematik bir şekilde incelemektedir. Onkogenik sinyal yollarında kritik rol oynayan kinazlara odaklanarak, LUAD için yeni terapötik hedefler bulmayı amaçlıyoruz. Tümör-normal farklılıkları ve tümörler arası varyasyonları içeren ayrıntılı analizler sonucunda, PLAU, MET, ERBB2, EGFR, PDK1 kinazları ve THBS2, CRABP2, INPP4B proteinleri gibi önemli aşırı ekspres edilen hedefler belirlenmiştir. Bu hedeflerin çoğunda transkriptomik değişim kanıtı bulunmamaktadır. Önerilen yaklaşımlar aracılığıyla belirlediğimiz bazı hedefler için mevcut inhibitör ilaçlar geliştirilmiştir, ERBB2 kinazı (Afatinib) ve VEGF-A proteini (Bevacizumab) gibi. Bulgularımız, akciğer kanserindeki bilinen terapötik belirteçleri doğrulamakta ve LUAD'e özgü aday protein hedeflerini ortaya koyarak, proteomik yöntemlerin kanser tedavisinde kişiselleştirilmiş tıbbin ilerletilmesindeki etkinliğini vurgulamaktadır.

Anahtar kelimeler: Ağırlıklı k-en yakın komşu (KNN) algoritması, akciğer kanseri, proteomik metodolojiler, hedefe yönelik tedavi, hassas onkoloji

molecular aberrations specific to the tumor [2]. Historically, treatment strategies for lung adenocarcinoma (LUAD) have predominantly focused on identifying potential drug targets through genomic and transcriptomic analyses [3]. However, these methods may overlook important therapeutic opportunities present at the protein level. Proteomic analysis, which focuses on the expression and functional alterations of proteins, offers a complementary approach that can reveal

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: abdulcadir.elmas@giresun.edu.tr (A. Elmas)
Geliş / Received: 03.09.2024 Kabul / Accepted: 03.10.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1542153

critical therapeutic targets that are not apparent through transcriptomic data alone [4-6].

Recent progress in mass spectrometry (MS) technology have significantly expanded global proteomic datasets, allowing for the quantification of nearly all proteins expressed in primary tumor cohorts [7,8]. This offers valuable opportunities to explore protein-level abnormalities, which may serve as prognostic biomarkers or therapeutic targets. Despite the extensive characterization of genomic aberrations, protein aberrations have historically been less well-defined, highlighting the urgent need for systematic analyses to identify potential targets [9].

In this work, we explore the proteogenomic landscape of LUAD by leveraging comprehensive mass-spectrometry (MS) proteomics data derived from 109 primary LUAD tumors and 102 matched normal samples [10]. Through the integration of these proteomic insights with genomic data and established drug-target relationships from the Drug-Gene Interaction database (DGIdb) [11], we aim to uncover novel protein targets that could be harnessed as effective therapeutic candidates. Our approach includes a detailed analysis of differentially expressed proteins (DEPs) to pinpoint those with significant alterations in tumor versus normal tissue. We also focus on kinases, which are often key players in oncogenic signaling pathways and are established therapeutic targets in various cancers [12]. Through this comprehensive analysis, we seek to uncover proteins that are overexpressed in LUAD and may serve as actionable targets for new or repurposed therapies. By comparing our proteomic findings with transcriptomic data, we also explore the relationship between protein-level overexpression and underlying genetic alterations, investigating whether protein overexpression is a result of genomic changes such as copy-number amplifications or post-transcriptional modifications, which can be missed in RNA-based analyses. This study seeks to advance precision medicine by focusing on protein-level abnormalities in LUAD and identifying potential druggable targets that could lead to improved patient outcomes. The findings have the potential to guide future therapeutic strategies and contribute to more personalized treatment approaches for lung cancer.

2 Materials and methods

2.1 Data sources, download, and standardized normalization

The proteomic and transcriptomic datasets for the LUAD cohort samples were obtained from The National Cancer Institute's Clinical Proteomic Tumor Analysis Consortium (CPTAC) [10]. The study involved 109 tumor specimens and 102 corresponding normal controls, obtained from 111 patients (34.6% female) with average onset age of 62.7 years. The dataset consisted of 11,029 quantified distinct proteins, including 507 kinases. The RNA-seq analysis generated gene expression profiles for the LUAD study group, using the tophat-cufflinks pipeline, identifying 35,220 protein-coding genes that showed FPKM > 1 in multiple samples,

including 640 kinase-encoding genes. Quantile and log₂ normalization were applied to the RNA-seq counts (FPKM-normalized), and genes not expressed in 20% or more of the samples were filtered out. The data distribution for the proteomics group was assessed, followed by the application of a uniform normalization method. The samples in this group were adjusted using their Median Absolute Deviation (MAD), standardizing them so that all samples across the different datasets shared a consistent (unit) MAD value. Additionally, protein markers with a significant amount of missing data (20% or more) were omitted from the analysis.

2.2 Identification of differentially-expressed proteins

A paired analysis was performed on the LUAD cohort to pinpoint proteins with differential expression by evaluating tumor samples against their corresponding normal tissues using the R package "limma" (version 3.42.2) [13]. Corrections were made for potential confounding variables, including batch effects (such as sequencing center/operator/date, TMT batch) and demographic factors (gender, age). The Benjamini-Hochberg (BH) procedure was utilized to correct p-values for multiple comparisons, aiming to manage the false discovery rate (FDR). Generally, no significant confounding influences were detected between protein expression levels and clinical variables like gender and age.

2.3 Detection of overexpressed proteins/genes

The OPPTI method [9] was employed to identify overexpressed markers. The method involves comparing marker expression levels to a predicted value for each tumor sample, which is derived using a k-nearest neighbor (KNN) algorithm. This algorithm calculates the predicted value based on the expression levels of other (nearest) co-expressed markers. The OPPTI method employs a permutation test to assess the statistical significance of a marker's calculated overexpression (dysregulation). Within the dataset, scores of dysregulation are shuffled among proteins in each sample, and baseline overexpression occurrences are estimated from these shuffles. This shuffling procedure is repeated several times, and the overall baseline overexpression occurrences from these repetitions are used to generate the permutation distribution.

3 Results and discussion

3.1 LUAD proteomics cohort

We curated genomic and comprehensive mass-spectrometry (MS) proteomics data from 111 lung adenocarcinoma patients [10], consisting of 109 tumor cases and 102 matched normal samples (Figure 1a). A standardized normalization process was applied, and stringent quality-control measures were followed (Methods), leading to the quantification of 11,029 proteins for our analyses. We also compiled a list of drug compound-associated genes from the Drug-Gene Interaction database (DGIdb) [11]. By aligning the measured proteins with the DGIdb list of druggable genes, we found that 1,834 proteins in our dataset are currently targetable by existing drugs.

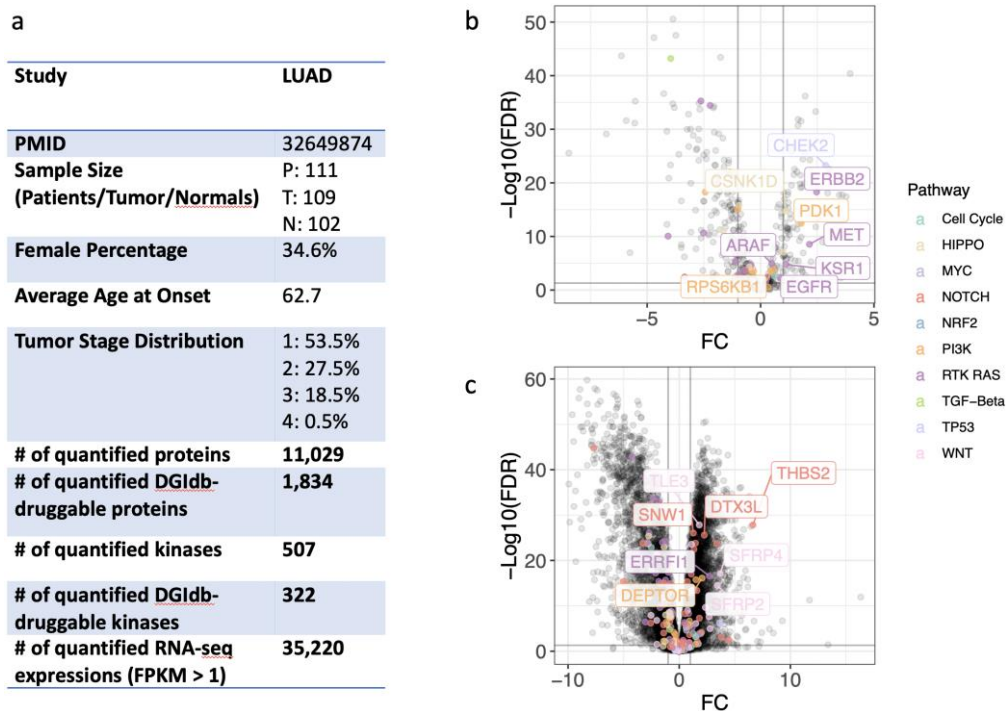


Figure 1. Overview of the study and differential protein expression in LUAD cohort. (a) Summary of the proteogenomic datasets from the human lung cancer cohort examined in this research. (b) Volcano plot illustrating the differential expression of kinase proteins between tumor versus normal samples, with the most significant kinases from oncogenic signaling pathways highlighted with labels. (c) The same analysis results in panel b for non-kinase proteins

Additionally, we selected kinase proteins for further examination, specifically concentrating on those known to be effective therapeutic targets across various cancer types. From a previously compiled set of 683 human kinase proteins [12], 507 were well-quantified within the LUAD dataset. Furthermore, these proteins were annotated by referencing ten oncogenic signaling pathways compiled by the TCGA PanCanAtlas, including PI3K, NOTCH, MYC, HIPPO, TGF β , RTK/RAS/MAP-Kinase, β -catenin/WNT, Cell Cycle, oxidative stress response/NRF2, and TP53 signaling pathways [12].

3.2. Differentially expressed proteins

We conducted a paired analysis comparing tumor and normal tissues to identify proteins with differential expression (tumor-DEPs), while controlling for potential confounding factors such as age, gender, and ethnicity, utilizing the limma package [13] in R (version 3.42.2) (Methods). Our analysis revealed 405 significant kinase DEPs through differential expression testing, applying empirical Bayes moderation to the t-statistics [13] and enforcing a stringent false discovery rate (FDR) threshold of < 0.05 . Of these DEPs, 42 were associated with oncogenic signaling pathways, and 6 kinases demonstrated more than 2-fold up-regulation in tumor samples, i.e., CHEK2 (log2-fold-change [FC] = 2.9, FDR = $6e-24$), ERBB2 (FC = 2.5, FDR = $6e-19$), PDK1 (FC = 1.8, FDR = $4e-13$), MET (FC = 2.2, FDR = $3e-09$), CSNK1D (FC = 1.1, FDR = $2e-15$), and KSR1 (FC = 1.1, FDR = $1.7e-05$) (Figure 1b).

Among the non-kinase proteins, a total of 8,219 differentially expressed proteins (DEPs) were identified (FDR < 0.05). Among these, 144 were associated with oncogenic signaling pathways, with 38 showing more than 2-fold up-regulation in tumor samples. Notable markers include THBS2 (FC = 6.6, FDR = $2e-28$), DTX2 (FC = 3.4, FDR = $2e-24$), SFRP4 (FC = 3.7, FDR = $8e-18$), DTX3L (FC = 2.3, FDR = $3e-26$), TLE3 (FC = 1.8, FDR = $2e-28$), and SFRP2 (FC = 3.4, FDR = $4e-15$) (Figure 1c). This differential expression analysis highlights a broad array of proteins that are elevated in tumor samples relative to normal tissues, necessitating further investigations to accurately identify and validate therapeutic targets among these DEPs.

3.3. Overexpression of currently-druggable proteins

To pinpoint potential therapeutic targets among overexpressed proteins in lung adenocarcinoma (LUAD), we employed OPPTI algorithm [9], a tool specifically designed for the detection of overexpressed proteins in global mass spectrometry (MS) proteomic datasets with varying quantitative distributions. This approach allows us to identify proteins that may exhibit efficacy upon inhibition and are not restricted by technical platform differences. We found 62 kinases with notable overexpression enrichment (permutation test by OPPTI for elevated markers, FDR < 0.05), of which 35 are DGIdb-listed druggable genes, including PLAU (Protein overexpression rate [PRO] = 27.5%, FDR = $2.3e-05$), WNK2 (PRO = 27.4%, FDR = $3.2e-05$), BMX (PRO = 26.2%, FDR = $8.5e-05$), and CKM (PRO = 24.8%, FDR = 0.00021) (Figure 2a, 2b). We also identified

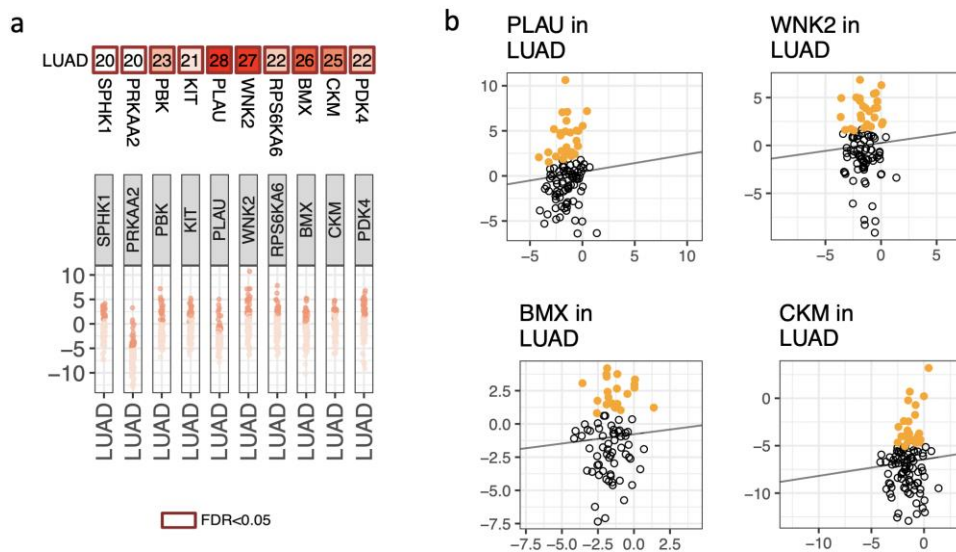


Figure 2. Overexpressed kinases in human LUAD tumors. (a) Druggable kinases exhibiting significant overexpression in LUAD cohort, detected by OPPTI. (b) Kinase overexpression at the sample level for the markers indicated in panel a, showing the observed expressions' (y-axis) deviation from their expected background values (x-axis), with the threshold value of overexpression not depicted

significant overexpression of 1,714 non-kinase proteins (OPPTI permutation test, $FDR < 0.05$), of which 379 are DGIdb-listed druggable genes, offering potential therapeutic targets in lung adenocarcinoma (LUAD), including CRP (PRO = 34.9%, $FDR < 1e-100$), MMP12 (PRO = 34.9%, $FDR < 1e-100$), MPO (PRO = 25.7%, $FDR = 1e-4$), and FCGR3B (PRO = 25.3%, $FDR = 2e-4$) (Figure S1a, S1b).

To enhance the confidence in identifying therapeutic targets based on expression, we compared differentially expressed proteins (DEPs) with overexpressed markers. 313 kinases were identified from DGIdb druggable genes, with 100 exhibiting elevated levels in both protein overexpression and differential expression (Table S1). Of these, 9 kinases demonstrated both notable differential expression (as assessed by the limma test with empirical Bayes moderation of t-statistics [13], $FC \geq 1$, and $FDR < 0.05$) and significant overexpression (determined by the OPPTI permutation test with $FDR < 0.05$), including PLAU (FC = 3.5; PRO = 27.5%), MET (FC = 2.2; PRO = 29.4%), WNK2 (FC = 2.6; PRO = 27.4%), and STK17A (FC = 3.5; PRO = 25.7%) (Figure 3). The RAS pathway, represented by MET, ERBB2 and EGFR kinases, displayed the highest levels of dysregulation, while other prominent kinases included CHEK2 from the TP53 pathway (FC = 2.9; PRO = 17.4%) and STK3 from the HIPPO pathway (FC = 1; PRO = 18.3%).

Within the non-kinase proteins, we identified 1512 druggable proteins (DGIdb) quantified in this cohort, with 570 of them exhibiting elevated levels in both protein overexpression and differential expression (Figure S2) (Table S2). Notably, 122 (non-kinase) proteins were significantly differentially-expressed ($FC \geq 1$, $FDR < 0.05$) and overexpressed ($FDR < 0.05$), including THBS2 (FC = 6.6; PRO = 33%), CRABP2 (FC = 5.8; PRO = 41.3%), and COL11A1 (FC = 4.4; PRO = 33.3%). CRABP2 has been identified as a promising target because its inhibition not

only reduces metastasis and invasion in lung cancer but also enhances the effectiveness of chemotherapy [14]. Furthermore, several targets we identified through both differential expression (DEP) and overexpression (OPPTI) approaches have approved corresponding inhibitor drugs, including ERBB2 kinase (FC = 2.5; PRO = 16.5%) (Afatinib [15]) and VEGF-A protein (FC = 3.3; PRO = 26.6%) (Bevacizumab/Endostatin [16]). The effectiveness of treatment strategies involving the inhibition of other targets we identified remains to be validated.

3.4. Comparison between transcriptomic and protein-level aberrations

Elevated protein levels can arise due to genomic changes like copy-number amplifications, but they can also occur through post-transcriptional mechanisms, making it undetectable at RNA level. To explore this possibility, we systematically compared the prevalence of protein overexpression in patients with the occurrence of transcriptomic abnormalities. To compare protein overexpression with mRNA overexpression, we applied OPPTI to the RNA-seq data obtained from the same LUAD samples (Methods). This analysis revealed 24 proteins, exhibiting substantial overexpression (>10%) at both the mRNA and protein levels, including SFRP4 (RNA = 22.6%; PRO = 29.4%), TP53 (RNA = 19.1%; PRO = 29.2%), CDKN2A (RNA = 10.4%; PRO = 29.7%), IRS2 (RNA = 20.9%; PRO = 25.7%) (Figure 4a) (Table S3).

Furthermore, we identified 11 proteins that exhibited substantial up-regulation ($\geq 10\%$) and had overexpression rates more than double those of their transcriptomic changes, including INPP4B (RNA = 13%; PRO = 33%) and THBS2 (RNA = 7%; PRO = 33%), and SFRP2 (RNA = 1.7%; PRO = 32%) (Figure 4b).

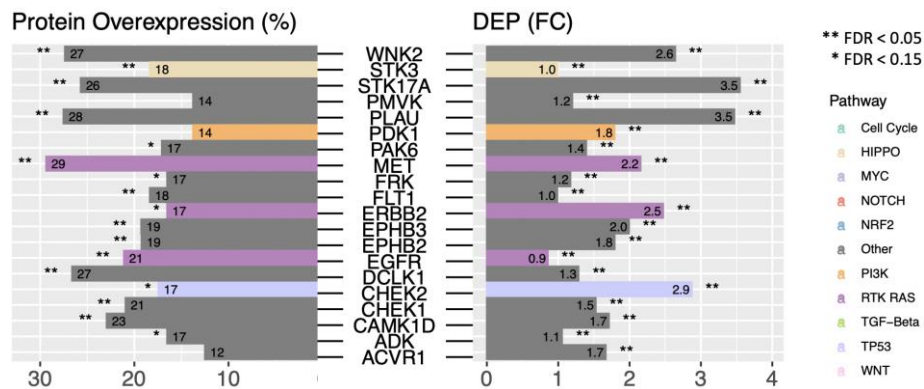


Figure 3. Potential LUAD kinase targets demonstrating protein overexpression and differential expression. Druggable kinases from DGIdb that exhibited substantially higher expression in tumors compared to normal tissues, as well as protein overexpression in the LUAD cohort

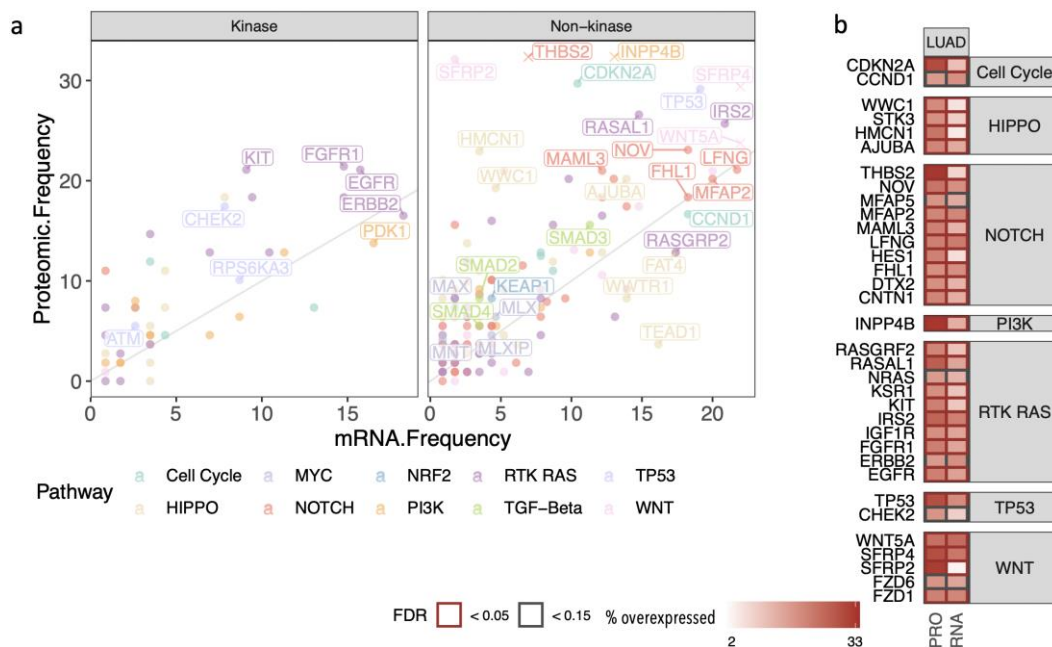


Figure 4. (a) Proportions of LUAD cases exhibiting protein and mRNA overexpression for genes involved in oncogenic signaling pathways. (b) Proteins from panel (a) that demonstrate significant enrichment for protein overexpression (FDR < 0.05) generally exhibit lower proportions of mRNA alterations

SFRP2 is a promising target for lung cancer because its overexpression inhibits the proliferation and metastasis of non-small cell lung cancer (NSCLC) cells by activating mitochondrial fission through the WNT signaling pathway, leading to reduced cell survival and increased apoptosis [17,18]. INPP4B (inositol polyphosphate 4-phosphatase type B) is also a potential therapeutic marker playing a dual role in both preventing tumor development by maintaining genome stability and inhibiting the PI3K-Akt-mTOR signaling pathway [19], and THBS2 is another prognostic marker in non-small cell lung cancer [20]. These findings underscore the limited presence of targets showing transcriptomic alterations in LUAD and illustrate that a proteomic approach could uniquely identify many

overexpressed targets that show significant alterations at the protein level but are not easily detected at the mRNA level.

4. Conclusions

In this study, we conducted a comprehensive proteogenomic investigation of lung adenocarcinoma (LUAD) utilizing mass spectrometry (MS) data from 109 primary LUAD tumors and 102 corresponding normal samples. Our objective was to identify potential therapeutic targets that might not be evident through transcriptomic analyses alone (Figure 1). We highlighted multiple proteins with differential expression between tumor and normal tissues (Figure 1), including several that exhibited significant overexpression in tumors, such as ERBB2, EGFR, PDK1, PLAU, CRABP2 (Figure 2, 3, S2). Integration of mRNA and protein expressions allowed us to pinpoint numerous

proteins in key signaling pathways with no corresponding alterations at the transcriptomic level, such as INPP4B, THBS2, SFRP2 (Figure 4). This array of proteogenomic analyses has uncovered a list of important targets in LUAD (Table S1, S2, S3).

Among the differentially expressed proteins, we identified several kinases and non-kinase proteins involved in various oncogenic signaling pathways that exhibit significant up-regulation in LUAD tumors, including MET and EGFR kinases, which are already established targets for non-small-cell lung cancer [21]. Numerous proteins with significant overexpression did not exhibit corresponding changes at the mRNA level (ex. INPP4B), suggesting that post-transcriptional mechanisms, such as protein stabilization or altered protein degradation, may contribute to the observed protein-level abnormalities. Thus, integrating proteomics and transcriptomics data could be critical for understanding tumor biology and developing effective therapies, such as INPP4B protein [19]. Additionally, we discovered several kinases and non-kinase proteins with notable overexpression that are not currently targeted by existing therapies, suggesting opportunities for developing new drugs or repurposing existing ones to address these novel protein markers. For example, functional evidence highlights PLAU as a promising target in lung squamous cell carcinoma, given its crucial role in metastasis, and suggests its potential for early diagnosis and therapeutic intervention to inhibit disease progression [22]. PDK1 is another promising target because its upregulation in NSCLC promotes tumor growth and metastasis, making it a potential prognostic marker and therapeutic target for NSCLC treatment [23]. We also identified WNK2 overexpression as an important biomarker for combination therapy in lung cancer, as its suppression by CBX8 promotes invasion and migration, suggesting that restoring WNK2 activity may inhibit these processes and potentially limit metastasis. Nonetheless, the efficacy of such approaches will need to be validated through preclinical and clinical studies to establish their therapeutic potential.

In summary, our study offers an in-depth analysis of the proteogenomic landscape in LUAD, revealing numerous potential therapeutic targets that enhance the insights gained from existing genomic and transcriptomic data. By concentrating on protein-level alterations, we have identified targets that might be overlooked by conventional methods, setting the stage for future research into innovative therapeutic strategies. Subsequent studies should focus on validating the therapeutic potential of these identified targets and investigating their roles in LUAD pathogenesis. We plan to integrate *in vitro* screenings of anticancer compounds on human LUAD cell lines (or employ other functional data, e.g., CCLE [24]), and examine the relationship between targeted protein levels and the survival of cells following treatment, enabling the identification of "expression-driven" dependencies [25]. Additionally, integrating proteomic data with other omics approaches, such as metabolomics and epigenomics, could provide further insights into the complex molecular mechanisms underlying LUAD and lead to more effective and personalized treatment options.

Data and software availability

Data for LUAD cohort [10] can be found on The National Cancer Institute's Clinical Proteomic Tumor Analysis Consortium (CPTAC) resources: <https://proteomic.datacommons.cancer.gov/pdc/study/PDC000153>, and <https://pdc.cancer.gov/pdc/>.

The marker overexpression tool OPPTI can be accessed via <https://github.com/Huang-lab/oppti>. The analyses performed were scripted in R programming language (v3.6.2).

Acknowledgements

The author wishes to acknowledge LUAD cohort and its participating patients and families that generously contributed the data. The author would like to thank the members of the Huang lab (<https://labs.icahn.mssm.edu/kuanhuanglab/members/>) for their valuable discussions that contributed to the development of this work. The author has thoroughly edited and verified all final codes and texts. This work was supported by Giresun University funds to AE.

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 9%

References

- [1] H. Sung, J. Ferlay, R.L. Siegel, M. Laversanne, I. Soerjomataram, A. Jemal, F. Bray, Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA: a cancer journal for clinicians*, 71(3), 209–249, 2021. <https://doi.org/10.3322/caac.21660>.
- [2] R. Ruiz-Cordero and W. P. Devine, Targeted therapy and checkpoint immunotherapy in lung cancer. *Surgical pathology clinics*, 13(1), 1, 17–33, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.path.2019.11.002>.
- [3] C. Swanton and R. Govindan, Clinical implications of genomic discoveries in lung cancer. *New England Journal of Medicine*, 374(19), 19, 1864–73, 2016. <https://doi.org/10.1056/NEJMr1504688>.
- [4] K.-L. Huang et al. Proteogenomic integration reveals therapeutic targets in breast cancer xenografts. *Nature Communications*, 8, 14864, 2017. <https://doi.org/10.1038/ncomms14864>.
- [5] K.-L. Huang et al., Spatially interacting phosphorylation sites and mutations in cancer. *Nature Communications*, 12(1), 1, 2313, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22481-w>.
- [6] K.-L. Huang et al., Regulated phosphosignaling associated with breast cancer subtypes and druggability. *Molecular & Cellular Proteomics*, 18(8), 1630–1650, 2019. <https://doi.org/10.1074/mcp.RA118.001243>.
- [7] M. J. Ellis et al., Connecting genomic alterations to cancer biology with proteomics: the NCI clinical proteomic tumor analysis consortium. *Cancer Discovery*, 3(10), 1108–12, 2013. <https://doi.org/10.1158/2159-8290.CD-13-0219>.

- [8] K. V Ruggles et al., Methods, tools and current perspectives in proteogenomics. *Molecular & Cellular Proteomics*, 16(6), 959–981, 2017. <https://doi.org/10.1074/mcp.MR117.000024>.
- [9] A. Elmas, S. Tharakan, S. Jaladanki, M. D. Galsky, T. Liu, and K.-L. Huang, Pan-cancer proteogenomic investigations identify post-transcriptional kinase targets. *Communications Biology*, 4(1), 1112, 2021. <https://doi.org/10.1038/s42003-021-02636-7>.
- [10] M. A. Gillette et al., Proteogenomic characterization reveals therapeutic vulnerabilities in lung adenocarcinoma. *Cell*, 182(1), 200-225, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2020.06.013>.
- [11] K. C. Cotto et al., DGIdb 3.0: a redesign and expansion of the drug-gene interaction database. *Nucleic Acids Research*, 46(D1), D1068–D1073, 2018. <https://doi.org/10.1093/nar/gkx1143>.
- [12] F. Sanchez-Vega et al., Oncogenic signaling pathways in the cancer genome atlas.” *Cell*, 173(2), 321-337.e10, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2018.03.035>
- [13] M. E. Ritchie et al., Limma powers differential expression analyses for RNA-sequencing and microarray studies. *Nucleic Acids Res*, 43(7), e47, 2015. <https://doi.org/10.1093/nar/gkv007>.
- [14] J. I. Wu, Y. P. Lin, C. W. Tseng, H. J. Chen, and L. H. Wang, Crabp2 Promotes Metastasis of Lung Cancer Cells via HuR and Integrin β 1/FAK/ERK Signaling. *Scientific Reports*, 9(1), 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37443-4>.
- [15] A. C. Garrido-Castro and E. Felip, HER2 driven non-small cell lung cancer (NSCLC): potential therapeutic approaches. *Translational Lung Cancer Research*, 2(2), 122–7, 2013. <https://doi.org/10.3978/j.issn.2218-6751.2013.02.02>.
- [16] B. Piperdi, A. Merla, and R. Perez-Soler, Targeting angiogenesis in squamous non-small cell lung cancer. *Drugs*, 74(4), 403–13, 2014. <https://doi.org/10.1007/s40265-014-0182-z>.
- [17] P. Li, S. Zhao, and Y. Hu, SFRP2 modulates non-small cell lung cancer A549 cell apoptosis and metastasis by regulating mitochondrial fission via Wnt pathways. *Molecular Medicine Reports*, 20(2), 1925–1932, 2019. <https://doi.org/10.3892/mmr.2019.10393>.
- [18] M. Montagner et al., Crosstalk with lung epithelial cells regulates Sfrp2-mediated latency in breast cancer dissemination. *Nature Cell Biology*, 22(3), 289–296, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41556-020-0474-3>.
- [19] Y. Sun et al., Loss of tumor suppressor inositol polyphosphate 4-phosphatase type B impairs DNA double-strand break repair by destabilization of DNA tethering protein Rad50. *Cell Death & Disease*, 11(4), 292, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41419-020-2491-3>.
- [20] Y. Bao, E. Yan, and N. Wang, Evaluation of GREM1 and THBS2 as prognostic markers in in non-small cell lung cancer. *Journal of Cancer Research and Clinical Oncology*, 149(10), 7849–7856, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00432-023-04746-7>.
- [21] N. Coleman, L. Hong, J. Zhang, J. Heymach, D. Hong, and X. Le, Beyond epidermal growth factor receptor: MET amplification as a general resistance driver to targeted therapy in oncogene-driven non-small-cell lung cancer. *ESMO Open*, 6(6), 100319, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.esmoop.2021.100319>.
- [22] P. Ning et al., PLAU plays a functional role in driving lung squamous cell carcinoma metastasis. *Genes & Diseases*, 11(2), 554–557, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.gendis.2023.04.010>.
- [23] T. Liu and H. Yin, PDK1 promotes tumor cell proliferation and migration by enhancing the Warburg effect in non-small cell lung cancer. *Oncology Reports*, 37(1), 193–200, 2017. <https://doi.org/10.3892/or.2016.5253>.
- [24] J. Barretina et al., The cancer cell line encyclopedia enables predictive modelling of anticancer drug sensitivity. *Nature*, 483(7391), 603–7, 2012. <https://doi.org/10.1038/nature11003>.
- [25] S. K. Jaladanki, A. Elmas, G. S. Malave, and K.-L. Huang, “Genetic dependency of Alzheimer’s disease-associated genes across cells and tissue types. *Scientific Reports*, 11(1), 12107, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91713-2>.



Supplementary Tables

Table S1. DGIdb druggable (kinase) proteins exhibiting elevated levels in both protein overexpression and differential expression

<https://www.columbia.edu/~ae2321/workspace/LUAD/TableS1.xlsx>

Table S2. DGIdb druggable (non-kinase) proteins quantified in this cohort, with 570 demonstrating elevated levels in both protein overexpression and differential expression

<https://www.columbia.edu/~ae2321/workspace/LUAD/TableS2.xlsx>

Table S3. Proteins exhibiting substantial overexpression (>10%) at either mRNA or protein levels (or both levels)

<https://www.columbia.edu/~ae2321/workspace/LUAD/TableS3.xlsx>

Supplementary Figures

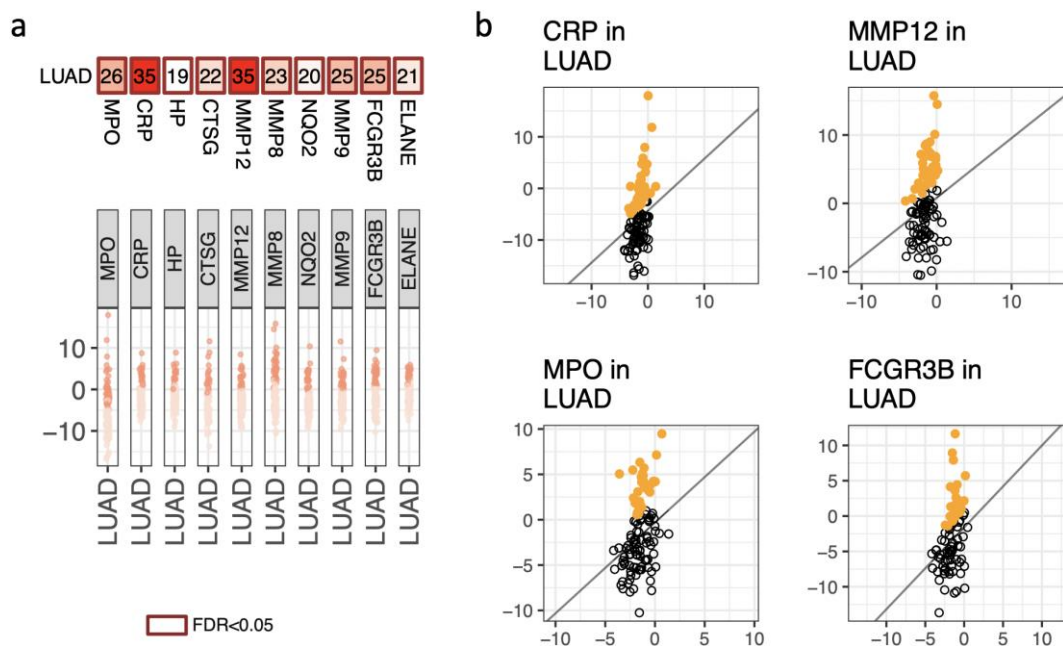


Figure S1. Non-kinase proteins overexpressed in human LUAD tumors. (a) The top ten druggable non-kinase proteins with the most pronounced overexpression in the LUAD tumors. (b) Marker overexpressions listed in panel a displayed at sample level.

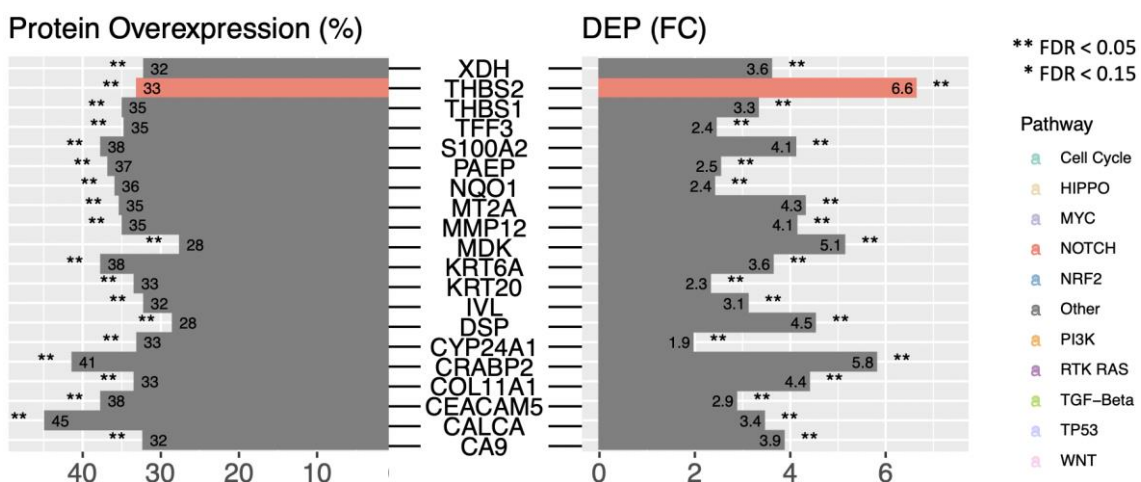


Figure S2. Non-kinase proteins that can be targeted by drugs, along with their associated compounds, demonstrated significantly elevated expression in tumor samples compared to normal tissues and exhibited protein overexpression within the LUAD cohort.

