

NÖHÜ MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ NOHU JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

ISSN: 2564-6605

Cilt: 13 Sayı: 2 2024
Volume: 13 Issue: 2 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 Üniversitesi, Türkiye*

Prof. Dr. Muhammad Imran Asghar

Hubei Üniversitesi, Çin/*Hubei University University of Hubei, China*

Prof. Dr. Ceyhun Karpuz

Pamukkale Üniversitesi, Türkiye/*Pamukkale University, Türkiye*

Prof. Dr. Cengiz Duran 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>

İngilizce Dil Editörleri/English Language Editors

Doç. Dr. Fatih Çelik	İnşaat Mühendisliği <i>Civil Engineering</i>
Doç. Dr. Hande Baltacıoğlu	Gıda Mühendisliği <i>Food 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>

Türkçe Dil Editörleri/Turkish Language Editors

Doç. Dr. Hasan Erhan Yücel	İnşaat Mühendisliği <i>Civil Engineering</i>
Dr. Öğr. Üyesi Hamdi Muratçobanoğlu	Çevre Mühendisliği <i>Environmental 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

Detection of micro-cracks in PV system using electroluminescence (EL) testing

Elektrolüminesans (EL) testi kullanılarak FV sistemindeki mikro çatlakların tespiti

Hale Bakır

413-418

Research Article /Araştırma Makalesi

Investigation of design and effects of a morphing winglet by applying a shape-memory alloy material on a passenger aircraft

Bir yolcu uçağına şekil hafızalı alaşım malzemesi uygulanarak dönüşen kanatçık tasarımının ve etkilerinin araştırılması

**Ahmet Kaplan, Sedat Nezh Karaal, Rafet Bodur, Hasan Bora, Görkem Şakacı,
Furkan Datlı, Fahrettin Öztürk**

419-428

Araştırma Makalesi/Research Article

Otonom araçlarda derin pekiştirmeli öğrenme yöntemleri ile sollama

Overtaking with deep reinforcement learning methods in autonomous vehicles

Fehim Köylü, Yasin Atıkan

429-439

Research Article /Araştırma Makalesi

Effect of Na₂S+NaOH pre-identification leaching on oxidized refractory Au-Ag ores

Oksitlenmiş refrakter Au-Ag cevherleri üzerinde Na₂S+NaOH ön tanımlama liçinin etkisi

Emine Yoğurtcuoğlu, İbrahim Alp

440-447

Research Article /Araştırma Makalesi

Design of an Android application for autonomous control of mobile robot

Mobil robotun otonom kontrolü için android uygulama tasarımı

Ahmet Top, Muammer Gökbulut

448-459

Araştırma Makalesi/Research Article

Hibrit uydu-hava-kara ağlarında hız bölmeli çoklu erişim tabanlı FSO/RF iletim

Rate splitting multiple access-based FSO/RF transmission in hybrid satellite-aerial-terrestrial networks

Mehmet Can, İbrahim Altunbaş

460-466

Araştırma Makalesi/Research Article

Sıkıştırılmaz bir sıvıyı varsayan Navier – Stokes denklemlerinin kesin çözümlerinin analizi

Analysis of exact solutions of Navier – Stokes equations assuming an incompressible fluid

Nesij Ünal, Yahya Öz, Tuğrul Oktay

467-472



Araştırma Makalesi/Research Article

Farklı derin sinir ağı modelleri birleştirilerek yakın kızılötesi görüntülerde yüz tespiti

Face Detection in near infrared images by ensembling different deep neural networks

Ahmet Ünlühisarcıklı, Ahmet Nusret Toprak

473-489

Research Article /Araştırma Makalesi

Investigation of treatability of automotive industry wastewaters by coagulation-flocculation, fenton and UV/H₂O₂

Otomotiv endüstrisi atıksularının koagülasyon- flokülasyon, fenton ve UV/H2O2 prosesleri ile arıtılabilirliğinin incelenmesi

Semih Ayberk Aldıĝ, Gamze Sönmez

490-499

Araştırma Makalesi/Research Article

Coğrafi bilgi sistemi ile hidroelektrik enerji üretimi amaçlı mini hidroelektrik santrali yeri seçimi: Sivas Kızılırmak Havzası örneği

Small hydroelectric power plant site selection for hydroelectric energy production with geographic information system: Sivas Kızılırmak Basin example

Sayiter Yıldız, Can Bülent Karakuş, Firdevs Bayrak

500-508

Research Article /Araştırma Makalesi

Multifunctional polymer nanocomposite coated antibacterial filters for air-purification

Hava temizleme için çok fonksiyonlu polimer nanokompozit kaplamalı antibakteriyel filtreler

Arife Kübra Yontar, Onur Yontar, Sinem Çevik

509-521

Araştırma Makalesi/Research Article

Protein adsorpsiyon çalışmaları için metal şelat grupları içeren pHEMA-GMA kolon dolgu malzemelerinin hazırlanması

Metal chelate for protein adsorption studies pHEMA-GMA column filling materials including groups preparation

Bahar Yılmaz Altınok, Mukaddes Keskinateş, Mevlüt Bayrakçı

522-527

Araştırma Makalesi/Research Article

Evrişimli sinir ağları kullanılarak ince kesit görüntülerden hidrotermal alterasyon türlerinin sınıflandırılması

Classification of hydrothermal alteration types from thin section images using convolutional neural networks

Rıza Çenet, Emre Ünsal, Oktay Canbaz

528-539

Research Article /Araştırma Makalesi

Novel true random bit generation and its audio encryption application with Lorenz chaotic circuit-based entropy source

Lorenz kaotik devre tabanlı entropi kaynağı ile özgün gerçek rasgele sayı üretimi ve ses şifreleme uygulaması

Esra İnce, Barış Karakaya, Mustafa Türk

540-549



Araştırma Makalesi/Research Article

Uçucu kül ve farklı seramik sektörü atıklarının kullanımı ile üretilen geopolimer harçların dayanım özellikleri

Mechanical properties of geopolymers produced with fly ash and various ceramic industry wastes

Ayşe Eser, Zahide Bayer Öztürk, İsmail İsa Atabey, Serhat Çelikten

550-557

Araştırma Makalesi/Research Article

Doğrusal olmayan EEG dinamikleri ile anksiyete tespiti

Detection of anxiety with non-linear EEG dynamics

**Elif Uğurgöl, Turgay Batbat, Demet Yeşilbaş, Miray Altunkaynak, Ayşegül Güven,
Esra Demirci, Nazan Dolu**

558-567

Araştırma Makalesi/Research Article

Doğal zeolit ve bentonitin karakterizasyonu ve CO₂ tutumunda kullanımı

Characterization of natural zeolite and bentonite and their use in CO₂ capture

Mehmet Şahin Ataş

568-574

Araştırma Makalesi/Research Article

29 Temmuz 2021 Mw=8.2 Chignik, Alaska Peninsula depremi deformasyonlarının bağıl konum belirleme servis sonuçları ile incelenmesi

Investigating the results of relative GNSS services with the July 29, 2021 Mw 8.2 Chignik, Alaska Peninsula earthquake

Deniz Öz Demir, Özge Güneş

575-581

Research Article/Araştırma Makalesi

Exploring the performance of PySpark and Scikit-Learn libraries in developing fall detection systems

Düşme algılama sistemlerinin geliştirilmesinde PySpark ve Scikit-Learn kütüphanelerinin performansının araştırılması

Erhan Kavuncuoğlu

582-592

Araştırma Makalesi/Research Article

Fındık küspesi ve kahve atığından aktif karbon üretimi ve karakterizasyonu

Activated carbon production and characterization from hazelnut bagasse and coffee waste

Derya Yıldız

593-599

Araştırma Makalesi/Research Article

Çinko atıklarından çinko geri kazanımı için sülfatlayıcı kavurma ve su liçi optimizasyonu

Optimization of sulfation roasting and water leaching for zinc recovery from zinc waste

Mehmet Ali Topçu

600-610

Araştırma Makalesi/Research Article

Yük frekans kontrol sistemlerinde gürbüz kararlılık zaman gecikmesi paylarının belirlenmesi

Determination of the robust stability delay margins for the load frequency control systems

Kübra Nur Gül, Şahin Sönmez, Saffet Ayasun

611-620



Araştırma Makalesi/Research Article

Farklı akışkanlar kullanılan Karşıt Akışlı Ranque–Hilsch Vorteks Tüp sisteminin soğutma performansının makine öğrenimiyle karşılaştırılması

Machine learning comparison of cooling performance of a Counterflow Ranque–Hilsch Vortex Tube system using different fluids

Murat Korkmaz, Ayhan Doğan, Volkan Kırmacı

621-631

Araştırma Makalesi/Research Article

Kablosuz güç transferi sistemi için Q faktörü etkisinin analizi

Analysis of Q factor effect for wireless power transfer system

Emrah Aslan, Yıldırım Özüpak

632-638

Araştırma Makalesi/Research Article

Lityum iyon batarya için dikkat mekanizmalı geçitli tekrarlayan birim (GRU) sinir ağını temel alan sağlık durumu (SOH) tahmini

State of health (SOH) estimation based on gated recurrent unit (GRU) neural network with attention mechanism for lithium-ion battery

Tuğhan Tunç, Hamit Erdem

639-647

Research Article/Araştırma Makalesi

Optimization of hot air drying conditions of purple-fleshed potato

Mor eli patatesin sıcak hava kurutma koşullarının optimizasyonu

Katibe Sinem Coruk, Hande Baltacıoğlu

648-656

Araştırma Makalesi/Research Article

Bakır-Gümüş (Cu-Ag) faz sistemi termodinamik veri analizi ve optimizasyonu

Thermodynamic data analysis and optimization of the Copper-Silver (Cu-Ag) phase system

Muhsin İder

657-664

Araştırma Makalesi/Research Article

Torna talaşı atıklarından demir oksit esaslı aerojel tozu üretimi ve karakterizasyonu

Production and characterization of iron oxide based aerogel from steel sawdust waste

Furkan Ahmet Coşkun, Melih Tümer, Zafer Yavuz Merkit, Hüseyin Özkan Toplan, Nil Toplan

665-671

Araştırma Makalesi/Research Article

Eğilme etkisi altındaki soğukta şekil verilmiş çelik konik çatı kirişlerinin sonlu elemanlar modellenmesine etki eden parametrelerin incelenmesi

Investigation of parameters affecting finite element modeling of cold formed steel conical roof beams under bending

Ramazan Oruç, Mehmet Emin Kara

672-679

Research Article/Araştırma Makalesi

Electric fish optimization for economic load dispatch problem

Ekonomik yük dağıtım problemi için elektrik balığı optimizasyonu

Yağmur Arıkan Yıldız, Özge Pınar Akkaş, Mustafa Saka, Melih Çoban, İbrahim Eke

680-689

Research Article/Araştırma Makalesi

Investigation on the mechanical properties of resin pin-reinforced marine sandwich composite structures under quasi-static indentation load

Yarı-statik batma yükü altında reçine pimi ile güçlendirilmiş denizel sandviç kompozit yapıların mekanik özelliklerinin incelenmesi

Fatih Balıkoğlu, Tayfur Kerem Demircioğlu, Mehmet Özer, Ali Işıktaş

690-696

Araştırma Makalesi/Research Article

2023 Kahramanmaraş depremleri sonrası Malatya ilinde yer alan yığma binaların hasar mekanizmasının incelenmesi

Investigation of damage mechanism of masonry buildings in Malatya province after 2023 Kahramanmaraş earthquakes

Alper Özmen, Ömer Faruk Taş, Ozan İnce, Muhammed Atar, Erkut Sayın

697-703

Research Article/Araştırma Makalesi

Performance comparison of visual transformer based models for shoulder implant classification

Omuz implantı sınıflandırmasında görü dönüşürücü tabanlı modellerin performans karşılaştırması

Elif Baykal Kablan, Yavuz Kablan

704-712

Araştırma Makalesi/Research Article

Bor nitrür kuantum nokta-grafen hidrojel kompozitinin süper kapasitör uygulaması

Supercapacitor application of boron nitride quantum dot-graphene hydrogel composite

Buse Sert, Ersan Harputlu

713-720

Research Article/Araştırma Makalesi

Application levels of urban transformation methods in zoning planning studies

İmar planlama çalışmalarında kentsel dönüşüm metotlarının uygulanma düzeyleri

Sıtkı Alper Özdemir, Mustafa Tolga Çöğürücü

721-728

Araştırma Makalesi/Research Article

Farklı hidrometeorolojik fenomenlerin karakterlerindeki değişimin zamana bağlı olarak iklim değişikliği çerçevesinde incelenmesi: Anamur örneği

Examining the changes in the characteristics of different hydrometeorological phenomena over time within the framework of climate change: Anamur case study

Volkan Yılmaz

729-737

Research Article/Araştırma Makalesi

Innovative frontiers: Advancing technologies for pesticide elimination in grape seeds

Üzüm çekirdeklerinde pestisit içeriğinin azaltılması için yenilikçi teknolojiler

Göksel Tirpancı Sivri

738-744



Derleme Makalesi /Review Article

Türkiye kömür rezervlerinin rasyonel değerlendirilmesi ve ekonomik önemi

Rational evaluation of the coal reserves of Turkey and their economic importance

Mahmut Suat Delibalta

745-749



Detection of micro-cracks in PV system using electroluminescence (EL) testing

Elektrolüminesans (EL) testi kullanılarak FV sistemindeki mikro çatlakların tespiti

Hale Bakır^{1,*} 

¹ Department of Electronics and Automation, Sivas Cumhuriyet University, Sivas, Türkiye

Abstract

With the increase in the use of solar energy, the investigation of the failures that cause the decrease in efficiency and loss in production is increasing day by day. It is extremely beneficial to conduct on-site testing of solar systems in order to evaluate the plant's actual performance and identify potential problems. There are important methods for on-site and fast detection of failures. In this study, the failures in the panels were analyzed using the Electroluminescence test, which is one of the most reliable methods for the detection of micro-cracks, and 11 failures were detected as a result of the EL imaging. The EL test, which is the most reliable method for detecting micro-cracks, has been compared with infrared thermal images and its superiority has been proven. Energy losses were prevented by intervening in the field with rapid fault detection.

Keywords: Detection of failures, Electroluminescence test, Energy losses, Solar energy

1 Introduction

Photovoltaic (PV) modules are the core of every PV system and the malfunctioning of these panels, which represent power generation, affects the overall plant performance. It is one of the elements in a PV site with a higher failure outlook, which is essential to produce reliable, efficient and safe energy. Maintenance of large-scale PV power plants has been viewed as an outstanding challenge for years. Quantitative analysis and characterization of fabrication, soldering, and PV defects is accomplished by electroluminescence (EL) visual inspection [1]. EL imaging has become some test procedure for fault detection of solar modules throughout the manufacturing, operating phases and installation. Defects such as micro-cracks, finger cuts and broken cells in k-modules can be quickly detected using this test, and PV potential power loss issues can be addressed powerful. The EL test is a very effectively examination method [2]. EL imaging is an embedded non-destructive technology for fault analysis of PV modules with the ability to display solar modules at a much higher resolution [3]. Defective cells appear darker on EL imaging, as disconnected portions do not irradiate. An EL image is obtained by applying a current that induces EL emission at a wavelength of 1150 nm to a PV module. The emission can

Öz

Güneş enerjisi kullanımının artması ile birlikte verimin düşmesine ve üretimde kayıplara sebep olan arızaların araştırılması gün geçtikçe artmaktadır. Tesisin gerçek performansını değerlendirmek ve potansiyel sorunları belirlemek için güneş enerjisi sistemlerinin yerinde test edilmesi son derece faydalıdır. Arızaların yerinde ve hızlı tespiti için önemli yöntemler mevcuttur. Bu çalışmada mikro çatlak tespiti için en güvenilir yöntemlerden biri olan Elektrolüminesans test kullanılarak panellerdeki arızalar analiz edilmiş ve EL görüntüleme sonucunda 11 arıza tespit edilmiştir. Mikro çatlakları tespit etmede en güvenilir yöntem olan EL testi kızılötesi termal görüntüler ile karşılaştırılmış ve üstünlüğü kanıtlanmıştır. Hızlı arıza tespiti ile sahada müdahale edilerek enerji kayıplarının önüne geçilmiştir.

Anahtar kelimeler: Arıza tespiti, Elektrolüminesans testi, Enerji kayıpları, Güneş enerjisi

be monitored with a silicon charge coupled (CCD) sensor device. Spatial image with high resolution enables detection of micro-cracks [4] and no blurring in EL imaging as there is lateral heat dissipation. However, visual inspection of EL images at night or in laboratories takes time, and this is done by trained professionals. Comprehensive knowledge of the properties of defects requires techniques to extract electrical data by providing information on physical origin, spatial distribution, or defect concentration [5].

Some studies used a combination of thermal and EL measurement techniques [6]. Such measurement techniques provide images with two-dimensional distribution of the properties of PV fast, high-resolution modules and real-time [7-8]. EL is excellent for series resistance monitoring, lifetime mapping, link fault zone monitoring [9]. EL is an effective technique for intermittent contacts, detecting micro-cracks or a series of operating faults, arguably a good method for determining the effect of these defects on module power output [10]. It can be used in the production process, the modules are disassembled from or in the field and shipped to the laboratory, or by going to the power plant at night, with EL cameras mounted on UAVs or a structure or a special tripod. As a result of this test technique, the emission intensity captured by an EL camera, thanks to the radiative recombination of charge carriers, is determined as

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: halebakir@cumhuriyet.edu.tr (H. Bakır)

Geliş / Recieved: 22.06.2023 Kabul / Accepted: 25.10.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1318611

the brightness displayed in the cell and indicates whether the cell or panel is defective and works accordingly. The EL test can give better results than the IRT test in detecting some faults, but it is weak in detecting some faults [11]. While the rate of detecting micro-cracks is 90-95% with the EL test, this rate is between 5-10% in the IRT test [12-13]. In terms of cost, the IRT test performs thermal imaging of many airborne panels at the same time and is more cost-effective. In the EL test, each panel must be examined in a laboratory environment or individual panel images must be taken even in the field, which results in higher costs [12-13]. In this study, EL test images and thermal images were compared and the advantages of the EL test and the weak points of the IRT test regarding the detection of micro-cracks are given.

2 Material and methods

2.1 Solar power plants

Solar power plants are power plants that convert energy particles from sunlight into electrical energy. Solar cells are used in power plants, similar to those in calculators, but in larger sizes. Solar cells are photovoltaic. They convert incoming sunlight into electricity. The main ingredients of these batteries are crystalline silicon and gallium arsenide. Solar power plants are a profitable energy way in terms of construction-operation costs and efficiency. It is widely used for these reasons. It is one of the energy production systems of the future in terms of minimizing the damage to nature. A 300 kW solar power plant is shown in the Figure 1.



Figure 1. Solar power plant

2.2 Electroluminescence (EL) test

The electroluminescence imaging technique is based on the principle that the energy obtained by the re-combination of the electron in the forward polarized state of the C-Si semiconductor emits photons. Fault detection is made by capturing photons by suitable digital cameras [3]. In this fault detection, a certain current of the module passes through the PV cell. Radiation emitted from the module in this test, which is carried out in a dark environment, is determined by an EL camera. Radiation has a wavelength of about 1100 nm and is in the invisible spectrum and can be considered near infrared [14]. Solar panels, which produce electricity during the day, are connected to a power source and emit radiation in the form of infrared light spectrum that is impossible to see in the dark. EL images, similar to x-ray images, have high resolution. Active cells appear bright grey,

damaged or inactive cells appear dark-black as shown in Figure 2(a). The grey scale in the acquired images provides to determine the extent and cause of the damage in your SPP site. In this method, problematic solar panels can be detected for further laboratory testing. With this qualified imaging method, damages reasoned by mechanical stresses such as installation, transportation, hail, snow, and faulty bypass diodes can be detected quickly. However, deterioration in cells, broken cells, short circuits and malfunctioning panels can be easily detected. On-site Electroluminescence testing is currently the most cost-effective method on the market for the early and clear detection of potential or existing problems of PV panels. Figure 2 (b) shows a EL camera mounted on a drone.

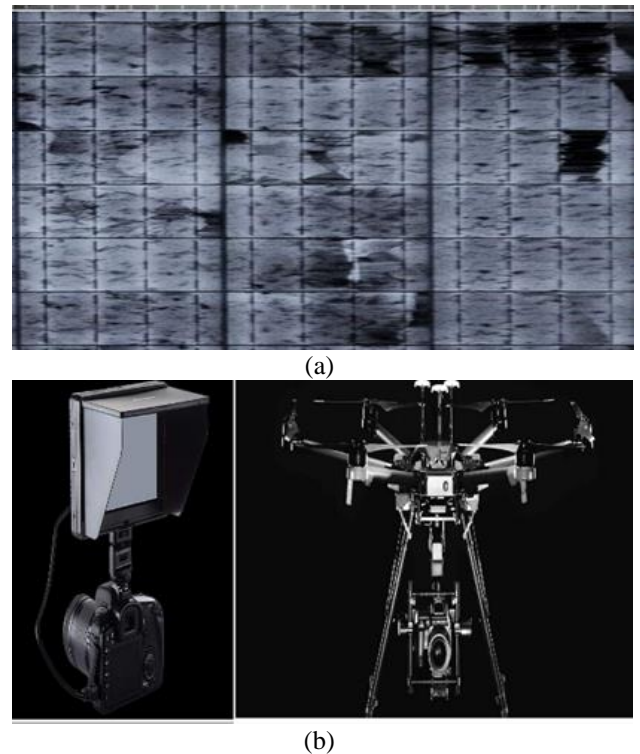


Figure 2. (a) Damaged cells, (b) EL camera on a drone

3 Results and discussion

Electroluminescence imaging is a method that provides information about the crystal structure on the cells that make up the module by analyzing the light in the upper infrared wavelength emitted by the PV modules as a result of voltage feedback. Micro cracks on the module, problems during cell and module production (soldering defects, ohmic contacts, etc.), malfunctions in module assembly and non-operating areas are easily determined.

In this study, according to the EL imaging conditions in Table 1, applied voltage is 49 V, applied current is 2 A, camera resolution is 6000x4000 pixel, focus length is 18 mm. Panel specifications and electrical values are given in Table 2. Values such as short circuit current and open circuit current are given according to bifacial gain values. It is also seen that the panel efficiency increases proportionally.

Panels tested by EL camera are shown in Figure 3. EL images taken with an electroluminescence test device are shown in Fig. 4-5. In Figure 4(a), the broken cells are seen in the darkest black areas with the EL test. In total, 8 broken cells were detected, as can be seen in Figure 4 (a-d). The problem cell is shown in Figure 5(a) with the EL test. In total, 3 problematic cells were identified, as can be seen in Figure 5 (a-c). With the EL test method, fast and precise resolution of failures is achieved. Cracks and breakages are visible. However, the type of failure occurring in the problematic cells is determined and energy losses are prevented by on-site intervention. Micro-cracks are cracks that occur on the panels and are difficult to see with the naked eye. Micro-cracks of the panel; may occur during production, transportation and installation phases. Although these cracks do not show their effect during the first installation and electricity generation, they may cause a decrease in the efficiency of the panel with the increase in the size of the cracks in the following periods. Any defects in solar cells, such as cracks, poorly soldered connections, and mismatches, cause higher resistance and become hot spots in the long run. A typical EL imaging setup is shown Figure 6. As a result, in this study, the number of samples displayed is 4, the number of cells displayed is 576, the number of damaged (broken / cracked / possible problem etc.) cell is 11. It is observed that the fractures/cracks detected in the panels have similar characteristics. This situation is not due to manufacturing defect, but rather transportation or assembly. It seems that the pressure applied to the panels during the process was created by impact. This should be compared and confirmed with their current condition by requesting the panel manufacturer's ex-factory electroluminescence images and IV measurements of the panels. Although it is thought that the detected "Possible Faulty" cells are not of the type that will affect the production at the moment, they are checked periodically. It is recommended to follow their development/progress.

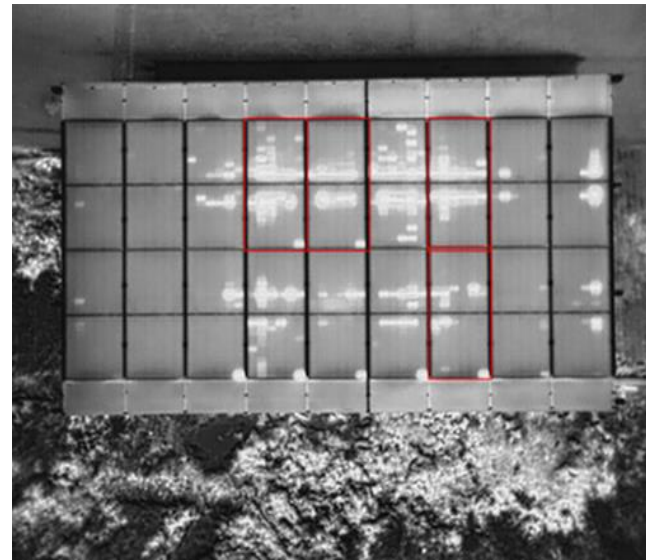


Figure 3. Solar power plant

Although measurements with infrared thermal cameras in Figure 7 are very popular, they are insufficient in detecting micro-cracks. According to the tests performed, the images obtained with the thermal drone are given in the Figure 8 (a)-(b). The detected fault type is the hot spot, that is, the point heating fault, which occurs with the square geometry in a single cell [15]. The fault is detected as point brightness. What kind of fault type there is must be determined again by going to the field. However, according to these results, the EL test is more effective, reliable and superior to infrared thermal imaging in detecting micro-crack defects. And this is clearly seen from the images [15].

Table 1 EL imaging conditions

Applied Voltage	Applied Current	Camera Resolution	Focus Length
49 V	2 A	6000x4000 pixel	18 m

Table 2. EL imaging conditions

Bifacial gain	Nominal power (Pmpp)	Nominal current (Impp)	Nominal voltage (Vmpp)	Short circuit current (Isc)	Open circuit voltage (Voc)	Panel efficiency
%5	414.75	10.24	40.52	10.11	49.72	20.23
%10	434.5	10.73	40.52	10.55	49.72	21.19
%20	474	11.70	40.52	12.05	49.72	23.12
%30	513.5	12.67	40.52	13.05	49.72	25.05

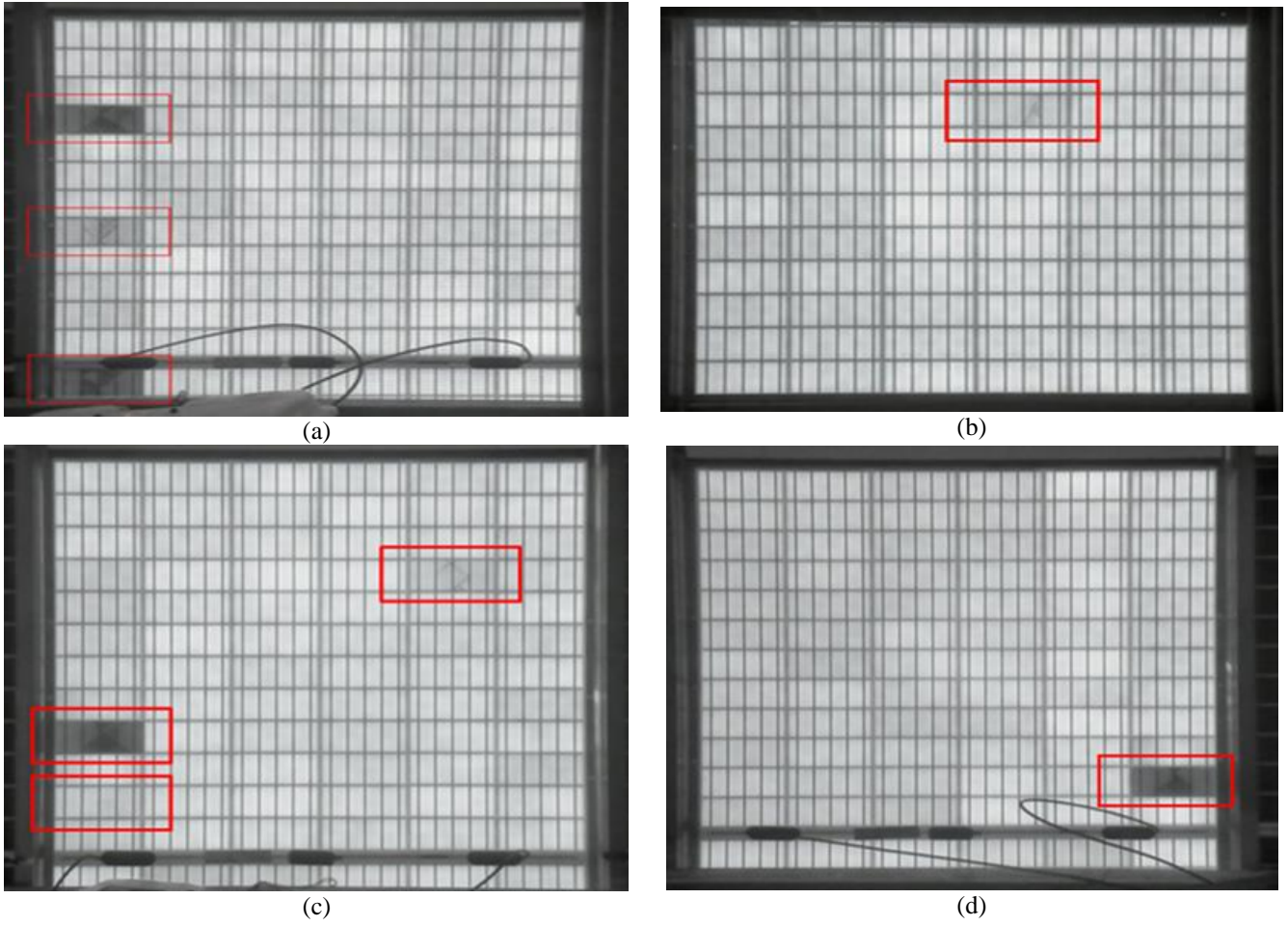


Figure 4. (a-d): EL images of broken cracked cells taken with an EL test device [16]

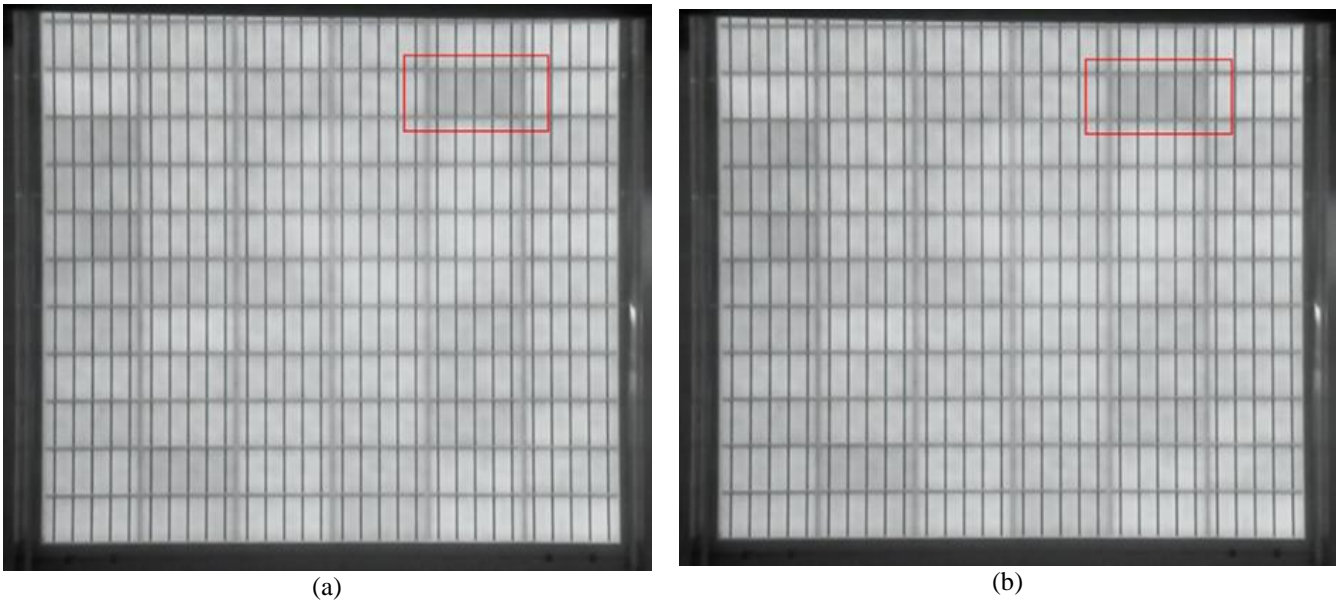
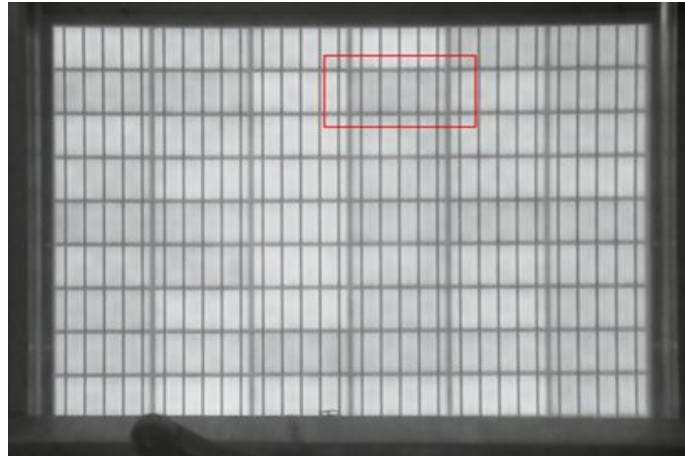


Figure 5. (a-c) EL images of problem cells taken with an EL test device



(c)

Figure 5 (continue). (a-c) EL images of problem cells taken with an EL test device



Figure 6. A typical EL imaging setup

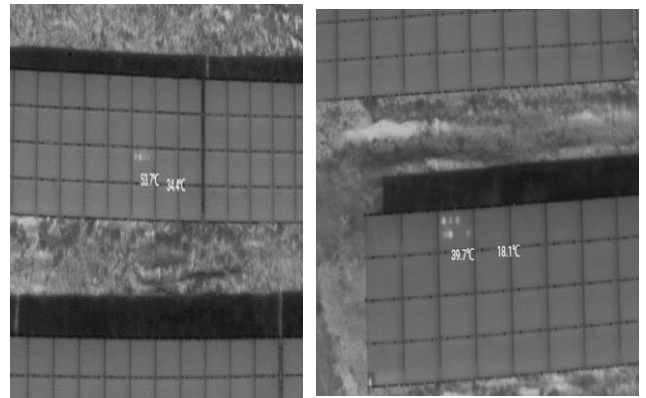


Figure 8. Thermal camera (Thermal drone)



Figure 7. Thermal camera (Thermal drone)

4 Conclusions

While it can be used in the production process, the modules are dismantled from the field or field and sent to the laboratory, measurements are made with EL cameras mounted on UAVs or a structure or a special structure by going to the power plant under night conditions, and the images are shown in this study. As a result of this testing technique, the emission intensity captured by an EL camera, thanks to the radiative recombination of charge carriers, is determined as the brightness displayed in the cell and indicates whether the cell or panel is faulty and operates accordingly. The EL test can provide 90-95% better results than the IRT test in detecting some faults (micro cracks). In the IRT test, this rate is very low because it is insufficient to detect micro cracks. In the images provided, it is seen that it is faster and more affordable in terms of cost since remote measurements are made with a thermal camera, but the ability to detect micro cracks from such a distance is between 5-10%. The IRT test, which is advantageous in detecting other faults, is insufficient at this point and the tendency towards EL testing is increasing. The methods used for fault detection have various advantages and disadvantages, and based on these, PV plant operators who apply only one of these techniques generally aim for rapid fault detection and rapid problem resolution in operation and maintenance

activities. Considering the structure of the parameters to be measured, the project site and other factors, it is recommended to use the most appropriate method for failure detection.

Acknowledgement

The companies that provided the thermographic images are thanked: Bakır Automation and Energy company and PETA Aerial Analysis company

Declaration of competing 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): 13%

References

- [1] S. Gallardo-Saavedra, L. Hernandez-Callejo, MD. Alonso-Garcia, JD. Santos, JI. Morales-Aragones, V. Alonso-Gomez, A. Moreton-Fernandez, MA. Gonzalez-Rebollo, O. Martinez-Sacristan, Nondestructive characterization of solar PV cells defects by means of electroluminescence, infrared thermography, I-V curves and visual tests: Experimental study and comparison. *Energy*, 205, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117930>
- [2] M. Y. Demirci, N. Besli, A. Gumuscu, Efficient deep feature extraction and classification for identifying defective photovoltaic module cells in Electroluminescence images. *Expert Systems with Applications*, 175, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114810>
- [3] T. Fuyuki, H. Kondo, T. Yamazaki, Y. Takahashi, Y. Uraoka, Photographic surveying of minority carrier diffusion length in polycrystalline silicon solar cells by electroluminescence. *Applied Physics Letters*, 86 (26), 2005. <https://doi.org/10.1063/1.1978979>
- [4] O. Breitenstein, J. Bauer, K. Bothe, D. Hinken, J. Muller, W. Kwapil, MC. Schubert, W. Warta, Can Luminescence Imaging Replace Lock-in Thermography on Solar Cells *IEEE Journal of Photovoltaics*, 1 (2), 159-167, 2011. <https://doi.org/10.1109/Jphotov.2011.2169394>
- [5] S. Duenas, E. Perez, H. Castan, H. Garcia, L. Bailon, The role of defects in solar cells: Control and detection Defects in solar cells. *Proceedings of the 2013 Spanish Conference on Electron Devices Valladolid, Spain, 2013*. <https://doi.org/10.1109/CDE.2013.6481402>
- [6] R. Ebner, S. Zamini, G. Újvari, Defect analysis in different photovoltaic modules using Electroluminescence (EL) and Infrared (IR)-thermography, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, Spain, 2010. <https://doi.org/10.4229/25thEUPVSEC2010-1DV.2.8>
- [7] R. Ebner, B. Kubicek, G. Ujvari, S. Novalin, M. Rennhofer, M. Halwachs, Optical characterization of different thin film module technologies. *International Journal of Photoenergy*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/159458>
- [8] I. Pvpas, I. Tsanakas, JS. Stein, KA. Berger, S. Ranta, T. Tanahashi, Z. Bayern, Review on Infrared and Electroluminescence Imaging for PV Field Applications, Technical Report T10-13, 2018.
- [9] W. Warta, MC. Schubert, W. Kwapil, J. Müller, D. Hinken, K. Bothe, O. Breitenstein, Luminescence Imaging versus Lock-in Thermography on Solar Cells and Wafers, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2011 <https://doi.org/10.4229/26thEUPVSEC2011-2CO.13.5>.
- [10] S. Deitsch, V. Christlein, S. Berger, C. Buerhop-Lutz, A. Maier, F. Gallwitz, C. Riess, Automatic classification of defective photovoltaic module cells in electroluminescence images. *Solar Energy*, 185, 455-468, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.067>
- [11] H. Bakır, Detection of Faults in Photovoltaic Modules of SPPS in Turkey; Infrared thermographic diagnosis and recommendations. *Journal of Electrical Engineering & Technology*.18(3), 1945-1957, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42835-022-01245-6>
- [12] M. Cubukcu, A. Akanalci, Real-time inspection and determination methods of faults on photovoltaic power systems by thermal imaging in Turkey *Renewable Energy*, 147(1) 1231-1238, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.075>
- [13] H. Açıköz, D. Korkmaz, Elektrolüminesans görüntülerde arızalı fotovoltaik panel hücrelerin evrişimli sinir ağı ile otomatik sınıflandırılması, *Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi*, 34(2), 589-600, 2022 <https://doi.org/10.35234/fumbd.1099000>
- [14] R. Evans, Interpreting module EL images for quality control *Proceedings of the 52nd Annual Conference, Australian Solar Energy Society, 2014* http://solar.org.au/papers/14papers/%23117_final.pdf
- [15] H. Bakır, Thermal image analysis for fault detection of PV systems in Ankara/Turkey. *European Journal of Science and Technology*, 41-44, 2022. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1098973>
- [16] P. A. Analysis. Test ve Ölçüm Hizmeti, Retrieved from. 2022 <https://www.petaerial.com>





Investigation of design and effects of a morphing winglet by applying a shape-memory alloy material on a passenger aircraft

Bir yolcu uçağına şekil hafızalı alaşım malzemesi uygulanarak dönüşen kanatçık tasarımının ve etkilerinin araştırılması

Ahmet Kaplan¹ , Sedat Nezh Karaal² , Rafet Bodur³ , Hasan Bora⁴ , Gorkem Sakaci⁵ ,
Furkan Datli⁶ , Fahrettin Ozturk^{7,*} 

^{1,2,3,4,5,6,7} Turkish Aerospace Industries, 06980, Ankara, Türkiye

⁷ Ankara Yıldırım Beyazıt University, Department of Mechanical Engineering, 06760, Ankara, Türkiye

Abstract

Continuous research and development have focused on optimizing wing aerodynamics and reducing fuel consumption in air vehicles since their inception. Winglets, fixed curved structures at wingtips, gained significant attention during the oil crisis for their fuel-saving potential in the aviation industry. This study focuses on designing a morphing winglet using a shape memory alloy (SMA) for improved aerodynamic efficiency and fuel economy under various conditions. The XFLR5 software analyzes the wing's lift and drag ratios at different aircraft stages (take-off, cruise, landing) for different cant angles. Results indicate that a moving winglet enhances the lift/drag ratio and reduces induced drag. Cant angle and angle of attack (AOA) variations play key roles in increasing this ratio. Optimal values for different aircraft stages are determined and discussed alongside existing mechanisms for moving winglets. Experimental data validation from previous studies in the literature concludes the research.

Keywords: Morphing winglet, Variable cant angle, Shape memory alloy, morphing winglet mechanism

1 Introduction

Low fuel consumption is a highly critical issue in the aerospace industry. Therefore, civil aviation regulators are asking manufacturers to reduce the long-term cost of fuel consumption, reduce carbon dioxide CO_2 and nitrogen oxide NO_2 emissions and thus, increase the efficiency of aircraft consumption. In order to increase the efficiency, it is necessary to examine the aerodynamic structure of the aircraft. Aircrafts fly based on pressure differences on the wing surfaces. Therefore, speed and pressure of air passing under and over the wings differ to keep the aircraft in the air. Due to this pressure difference, lift-induced drag might occur. For example, a transport aircraft shows that the magnitude of the lift-induced drag can be 40 % of the total drag at cruise conditions and 80 - 90% of the total drag during take-off and climb conditions [1-5].

Öz

Sürekli araştırma ve geliştirme, başlangıcından bu yana hava araçlarında kanat aerodinamiğini optimize etmeye ve yakıt tüketimini azaltmaya odaklanmıştır. Kanat uçlarındaki sabit kavisli yapılar olan kanatçıklar, havacılık endüstrisindeki yakıt tasarrufu potansiyeli nedeniyle petrol krizi sırasında büyük ilgi görmüştür. Bu çalışma, çeşitli koşullar altında gelişmiş aerodinamik verimlilik ve yakıt ekonomisi için şekil hafızalı alaşım (SMA) kullanan bir geçiş kanatçığı tasarlamaya odaklanmaktadır. XFLR5 yazılımı, farklı eğim açıları için farklı uçak aşamalarında (kalkış, seyir, iniş) kanadın kaldırma ve sürüklenme oranlarını analiz eder. Sonuçlar, hareketli bir kanatçığın kaldırma/sürüklenme oranını artırdığını ve indüklenen sürüklemeyi azalttığını göstermektedir. Cant açısı ve hücum açısı (AOA) varyasyonları bu oranın artırılmasında anahtar rol oynamaktadır. Kanatçıkların hareket ettirilmesine yönelik mevcut mekanizmaların yanı sıra, farklı uçak aşamaları için en uygun değerler belirlenmekte ve tartışılmaktadır. Literatürdeki önceki çalışmalardan elde edilen deneysel verilerin doğrulanması araştırmayı sonuçlandırmaktadır.

Anahtar kelimeler: Dönüşen kanatçık, Değişken eğim açısı, Şekil hafızalı alaşım, Geçiş kanatçık mekanizması

One way to reduce lift-induced drag is to increase the wingspan. However, increasing the wingspan requires further strengthening of the wing structure. The increase in the wingspan also increases the moment affecting the wing. Aircraft manufacturers use a curved wing tip which they call "a winglet" in order to reduce lift-induced drag. Aircraft manufacturers have produced curved wing structures in different forms [6, 7]. Many studies have found that winglet addition to an aircraft can achieve a fuel burn reduction by about 4-6 %, reduce the take-off distance and increase the climb rate. Note that the fuel consumption of an aircraft should be minimized during the flight period. Studies on this subject suggest curved wingtip designs [3-5, 8].

In the winglet condition, vortices formed at the wing tips were reduced, and fuel savings were achieved. However, with this type of wing, there is also a decrease in the lifting

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: fahrettin71@gmail.com (F. Ozturk)

Geliş / Received: 11.12.2023 Kabul / Accepted: 27.12.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1396487

force, which is needed during take-off. By comparing these two situations, it could be adjusted in the most efficient positions with a morphing winglet. In Figure 1, the use of winglets on aircraft can reduce the impact of vortex separations, which occur when air moves from high to low pressure. This effect is demonstrated by comparing the vortex separations with and without winglets on the aircraft.

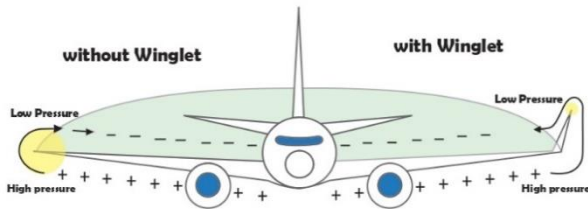


Figure 1. Vortex distribution for different wingtips

As the wing's lift deflects air, the overall lift vector is tilted backward. The aft component of the lift vector induces drag. Thus, induced drag is the rear component of the lift vector. By increasing the lift system's horizontal span or vertical height, the induced drag can be reduced (i.e. the length of the trailing edge holding the vortices can be increased). The lift force at the wing tips increases by widening the distribution of the vortices along the trailing edge through vanes. As a result, the induced drag is reduced. The induced drag reduction's main benefit depends on the wing's lift distribution in the direction of the wing span [6].

Figure 2 proves that the total drag of the wing with the winglet is less than the total drag of the wing without the winglet while operating above the crossing line or the line passing through the crossing point (the place where the two poles connect). In comparison, the overall drag of the wing without a winglet is lower than that of the wing with winglets when operating below the diagonal line. Therefore, winglets should not be used if you want to reduce overall drag. On the other hand, the employment of a winglet is aerodynamically justifiable if the wing is to function in ascending conditions (the light grey zone in Figure 2), as the wing creates less drag for a given lift. As a result, an aircraft may be more effective if its wing form can be modified according to its flight mission [9].

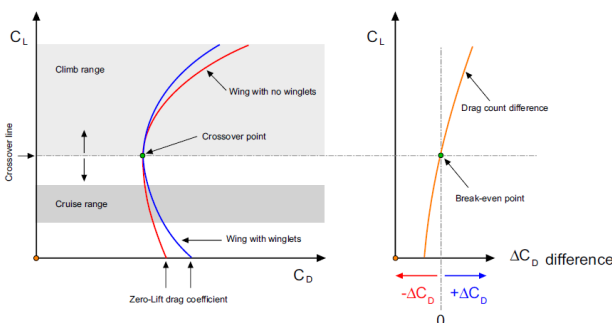


Figure 2. The drag polar of two hypothetical wings in an assumed flight condition [9]

During the 1970s and 1980s, researches conducted by NASA [10, 11] led to the development of vertical extensions that can be attached to wing tips to reduce aerodynamic drag without increasing the wing span. The first aircraft to adopt winglets were within the general aviation and business jet communities. In the mid-eighties, Boeing produced the 747-400 commercial jetliner, which used winglets to increase its range [12].

The SMAs are a class of metallic materials that have the ability to return to a predefined shape or size when subjected to certain stimuli, typically heat. They can undergo a reversible phase transformation from a low-temperature, deformed state to a high-temperature, stress-free state. When the material is heated, it reverts back to its original shape, and when it is cooled again, it retains that shape until the next heating cycle [13].

Crystal structure is an important factor that determines the physical and chemical properties of materials. Crystal structure affects the hardness, fracture toughness, thermal conductivity, electrical conductivity, optical properties and many other properties of materials. As described in Figure 3, these alloys are sensitive to heat changes and can also have two different crystal structures above or below critical conversion temperatures. Although they deform at low temperatures, they can return to their former state at high temperatures [14].

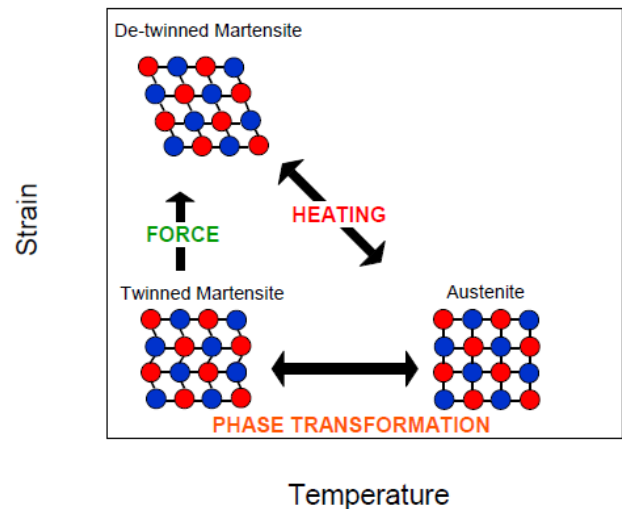


Figure 3. Temperature and load-induced phase transformations in the SMAs [13]

At high temperatures, nitinol assumes an interpenetrating simple cubic structure referred to as austenite (also known as the parent phase). At low temperatures, nitinol spontaneously transforms to a more complicated monoclinic crystal structure known as martensite (daughter phase). There are four transition temperatures associated to the austenite-to-martensite and martensite-to-austenite transformations [15].

Nitinol alloys exhibit two closely related and unique properties: the shape memory effect and superelasticity. Superelasticity is the ability for the metal to undergo large deformations and immediately return to its undeformed

shape upon removal of the external load. Nitinol can deform 10–30 times as much as ordinary metals and return to its original shape [16]. Crucial to nitinol properties are two key aspects of this phase transformation. First is that the transformation is "reversible", meaning that heating above the transformation temperature will revert the crystal structure to the simpler austenite phase. The second key point is that the transformation in both directions is instantaneous.

The Carnot cycle consists of four reversible processes: isothermal expansion, adiabatic expansion, isothermal compression, and adiabatic compression. The Carnot cycle is a theoretical construct and is not used in practice, but it is useful for exploring the efficiency limits. When the latter properties are important, the given design rules should be handled with care. In general, a SMA actuator can never have a greater efficiency than a Carnot cycle between heating and cooling temperature [17].

Table 2. Efficiency and energy density of actuators manufactured using the NiTi alloys based on different loading types [18]

Loading Type	Efficiency (%)	Absorbed Amount (J/kg)
(Carnot)	9.9	-
Tensile	1.3	446
Torsion	0.23	82
Bending	0.013	4.6

Note: Calculated using only elastic deformation quantities for comparison

The benefit of using wires as an active element is that the material is used to its fullest extent and that the least amount of the SMA is used to generate the appropriate amount of work. Table 1 provides an illustration of the benefits of using tension laden straight wires. In order to compare three load situations, the numbers in this table were derived using a pure elastic deformation, which is merely an approximate estimate. There are similar considerable solutions in this field; most examples in this domain are folding winglets for ground-based operations [19-22], reduction of induced drag when the aircraft is in the air at different cant angles [23-25], wing load alleviation mechanisms [26]. In other examples, the SMA has been used to reduce induced drag when the aircraft is in the air at different cant angles, but less work has been done for this purpose [27-29].

The temperature required to induce the shape-memory effect in shape-memory alloys is determined by their chemical composition. For nickel-titanium alloys, this temperature range is between -100 and +100 °C. It's important to note that there is a limit to the amount of strain that shape-memory alloys can withstand. If the material is deformed beyond this limit, full shape recovery cannot be achieved. The strain limit for nickel-titanium alloys is approximately 8.5%, which is high enough for many aerospace applications [30].

The variables in the wing must be determined to find the optimum position at different stages for a designed wing and winglet. Thus, the optimum position can be found by analyses by changing aerodynamic and characteristic properties of the wing. Some of the affecting wing

aerodynamics are AOA, sweep angle, cant angle and aspect ratio. These values vary according to different conditions and requirements for aircrafts. For this reason, parametric analysis, variables and constants should be determined.

The AOA is the angle between oncoming air or relative airstream and a chord line on the aircraft. Sometimes the reference line connects the leading and trailing edges at an average point on a wing. Most commercial jet aircraft use the fuselage centerline or longitudinal axis as the reference line [31].

As the nose of the wing turns up, the geometric AOA as well as lift increases. Drag goes also up, but not as quickly as lift. Therefore, increasing the geometric AOA until a certain point is efficient because of the increasing lift. This certain point is called critical or stall angle-of-attack. The lift coefficient decreases as the AOA decreases below the critical AOA. Conversely, as the AOA increases over the critical angle-of-attack, air begins to flow less smoothly across the airfoil's upper surface and begins to separate from it.

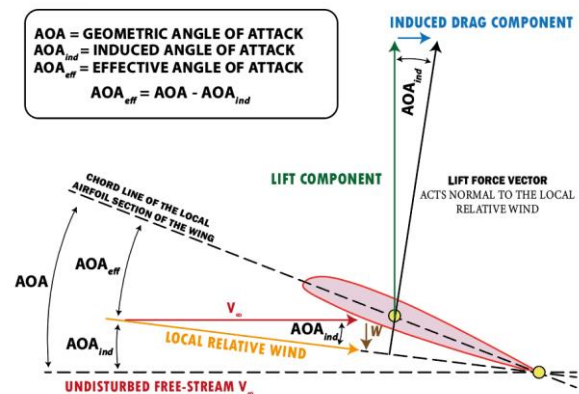


Figure 4. The AOA on an airfoil

The cant angle is an important parameter that should be considered in the design when aerodynamic factors are considered in the airfoil system. As seen in Figure 4, the cant angle is the angle of the winglet's normal line with the wing's normal line parallel to the surface. The cant angle determined as an independent variable in our analyses is shown in Figure 5. It is determined as the angle made by the wing tip with the horizontal.

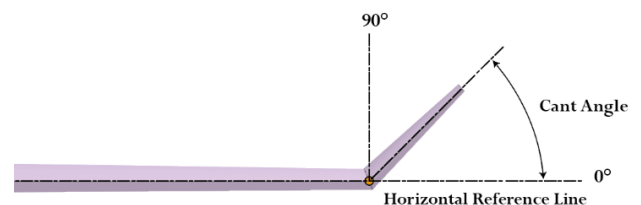


Figure 5. Cant angle relative to the horizontal reference line on the wing with winglet

Wing span is defined as the width of an aircraft wing as shown in Figure 6. It represents the longest distance from one

end of the wing to the other. This distance directly affects lift and drag of the wing. As the wing span increases, so does the lift of the wing, but also the drag. Wingspan is considered a decisive parameter in wing design. It is related to the size, weight, and placement of the wing and is one of the main design factors that affect the performance of aircraft.

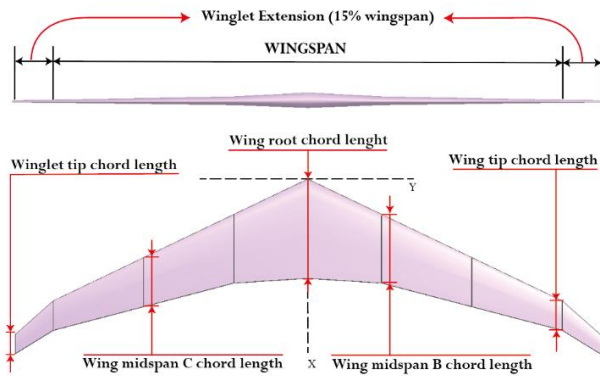


Figure 6. The front view of the wing with a winglet in the Figure on the top, the top view of the wing with a winglet, and the wing with winglet parameters in the Figure on the bottom

Sweep angle is the angular change of the wing from the root to the tip, which is the difference between the angle which the wing makes with the horizontal plane at the root and at the tip. This angle on the designed winglet is shown in Figure 7. This parameter affects the aerodynamic performance of the wing, especially the behavior of the boundary layer at the wingtip.

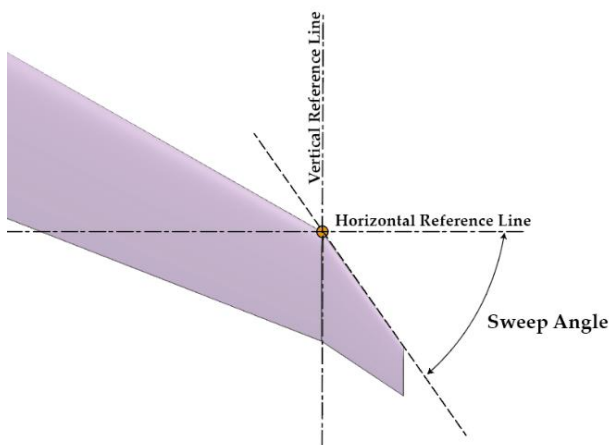


Figure 7. Winglet sweep angle according to the vertical and horizontal reference lines on the wing with winglet

As the speed of the aircraft increases, airflow passes over the wing more quickly and the wing generates more lift. However, at high speeds, the drag also increases, which increases the resistance of the wing. Therefore, the design of aircraft is optimized according to their speed, and the design of the winglet is also made in accordance with this speed.

The speed of the aircraft can be expressed by the Mach number. The Mach number is a parameter that expresses the speed of the aircraft in relation to the speed of reaching sound (the speed of sound). The wing design and the aerodynamic performance of the winglet are closely related to the Mach number of the aircraft.

Airfoil design is an important parameter in winglet design. The airfoil is defined as the cross section of the wing. It greatly affects the aerodynamic performance of the wing. The airfoil design is determined to optimize buoyancy, resistance, and strength characteristics of the winglet. The airfoil design, working together with the shape, size and sweep angle of the wing, determines aerodynamic characteristics of the wing. The aerodynamic efficiency of the wing and the design of the airfoil is typically studied carefully to make sure that the airfoil design is done correctly and is compatible with other factors in the design of the winglet. Since a passenger aircraft is examined in this study, the Boeing-737 airfoil is applied.

2 Method and analysis

In this study, a mechanism capable of different cant angles was targeted. According to this purpose, the cant angle should be set in the horizontal position in the same position as the base wing or the vertical position (including intermediate cant angles). Moreover, the winglet can be positioned according to the best lift-induced drag reduction for different flight conditions (take-off, climb, cruise, landing). When the aircraft is on the ground, the wingspan can be reduced to fit more easily into gangways and hangars. In different weather conditions, the winglet can be adjusted to the position that will apply the least moment to the aircraft with the winglet feedback system in side winds.

First, speeds of a commercial aircraft under optimum take-off and cruise conditions were taken into account. Mach number equivalents of these values were determined as 0.3 for take-off and 0.84 for cruise [32]. Furthermore, depending on results of numerical studies, winglet angles at which the best aerodynamic performance is obtained according to the flight phases are proposed. Then, based on these optimizations, a mechanism using the SMA is suggested to move the winglet.

One of the objectives of this research is to compare drag and lift forces of the aircraft at take-off and cruise stages using the different AOA values. In this way, it is desired to be able to comment on the induced drag change. Figure 8 shows the layout of these airfoils on the Boeing 737 wing. While designing the wing, the wing parameters of the Boeing 737 aircraft were taken and scaled [33]. Winglet span, according to the information obtained from the sources, is recommended to take 10-20% of the wing span determined for the baseline wing [1,34]. In this study, the wingspan was determined as 15%. Additionally, a sweep angle of 60° was selected, as shown in Figure 7, which yielded the best efficiency according to the research [9]. Since the aircraft will be moving at low speeds during take-off, analysis results at $Ma=0.3$ and higher AOA values are relevant for the state of the aircraft during take-off. For the aircraft during the

cruise, the analysis is performed for $Ma=0.84$ and lower AOA values.

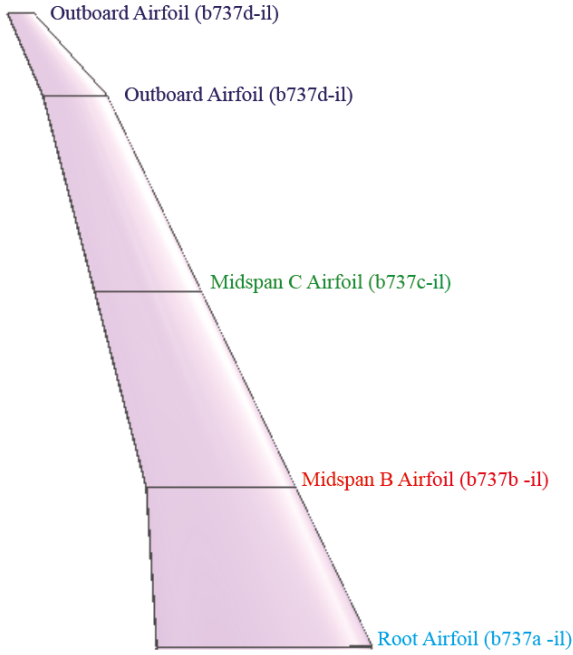


Figure 8. Boeing 737 airfoil layout on the wing

All required data for the analysis are summarized and given in Table 2 and 3.

Table 2. The wing parameters for the analysis

Design Variables	Values
Winglet cant angle	0°, 15°, 45°, 80°
Angle-of-attack at $Ma = 0.3$	0°-20° (spaced at intervals of 2)
Angle-of-attack at $Ma = 0.84$	0°-10° (spaced at intervals of 2)

Table 3. The wing parameter constants for the analysis

Design Constants	Values
Wing airfoil geometries	Boeing 737
Winglet sweep angle	60°
Wingspan	Base wing + 15 %

In this study, analyses were performed using the XFLR5 software. Neumann and Dirichlet can be selected for the far-field boundary condition in the analysis. Thus, there are no significant gradients normal to surface boundaries. The wing is modeled as a no-slip wall, i.e. a continuous wall for turbulent values. There are four different analysis methods for XFLR5; LLT (wing only), Horseshoe vortex (VLM1) (No sideslip), Ring vortex (VLM2), and 3-D Panels methods. In this study, analyses are performed using the 3-D Panels method. Documentation for the software states that viscous effects might not be captured properly especially for the 3D panel method (leading to 20% error in lift coefficient estimates). It provides the opportunity to observe breaks in the transition from wing to fin by obtaining the pressure graph. When wing and winglet were modeled in accordance with these parameters, the first airfoil analysis was

performed. These analyzes were performed with different Reynolds numbers that were increased regularly because the XFLR5 program determines trends of the aircraft in different weather conditions and at different speeds after the integration of the airfoil into the wing according to the data obtained from this airfoil analysis. For this reason, we introduced the program by increasing the iterations by considering all conditions while performing the airfoil analysis. Note that it is desired to obtain a result by converging the Reynolds number to one value at different AOA values at different velocities. After this 2D airfoil analysis, we created a 3D wing structure and interpreted these results by obtaining the lift force, drag force, induced drag and Lift/Drag ratio for the wing using the 3-D Panels method.

Lift (L) and drag (D) forces are obtained by integrating pressures applied to the wing surface and wall shear stresses. Lift coefficient C_L and drag coefficient C_D are obtained as follows,

$$C_L = \frac{L}{0.5 \times \rho \times V_\infty^2 \times S_{ref}} \quad (1)$$

and

$$C_D = \frac{D}{0.5 \times \rho \times V_\infty^2 \times S_{ref}} \quad (2)$$

where ρ is the air density, V_∞ is the free-stream velocity and S_{ref} is the wing reference area. It is the wing area in the top view when specifying the S_{ref} for the lift. S_{ref} for drag is the wing area in the front view. By the flight principle, the drag force should be reduced while trying to increase the lift force. An aerodynamic efficiency parameter (C_L/C_D) is obtained based on this situation. The higher this value, the higher the efficiency will be.

3 Mechanism design

The design was developed based on an extensive review of existing research and studies on winglet mechanisms developed with and without the SMA. The main objective is to propose a new winglet movement mechanism using the SMA that meets desired criteria. The aim of this study is to determine advantages and limitations of the SMA-based mechanisms over their non-SMA counterparts by examining the current situation in winglet design. Results might contribute to the development of an optimized SMA-based winglet mechanism with improved performance.

The primary objective of this study is to achieve the desired winglet angle by converting linear movement into rotational movement through heating SMAs within a range of motion between 0° and 90°. Furthermore, the mechanism should incorporate a locking system to ensure the winglet angle remains fixed at the desired position.

In the design of the winglet movement mechanism, emphasis is placed on minimizing friction losses to optimize the movement power of the SMAs. The mechanism is designed with simplicity in mind, utilizing a limited number of materials and straightforward elements. This approach

facilitates easy maintenance and assembly processes. Additionally, careful consideration is given to the size and strength of the mechanism to ensure suitability for the wingtip application.

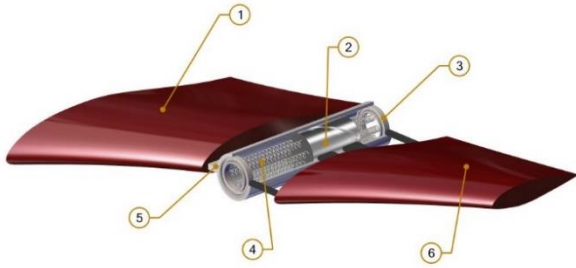


Figure 9. BOM ID of mechanism components

Table 4. Name, quantity, and material properties according to the BOM ID

BOM ID	Name	Quantity	Material
1	Base wing	1	Composite
2	Female slot cylinder	1	Aluminum alloy
3	Roller	1x2	Chrome steel
4	SMA spring	6x2	Shape memory alloy
5	Mechanism bearing-male slot	1	Aluminum alloy
6	Winglet	1	Composite

Table 4 shows the bill of material of the parts of the mechanism. The working logic of the mechanism (Figure 9) is described as follows:

The working principle of the mechanism is the conversion of linear motion into rotational motion.

Heating the SMA springs with the help of electric current creates linear motion. This movement causes the female-slot cylinder in the mechanism to make a rotational movement. This movement is transferred directly to the winglet and allows the angle of the winglet to be changed.

When the desired angle is reached with the help of the encoder, it is assumed that the locking mechanism in the system activates and ensures the fixation of the mechanism at this angle (Figure 10).

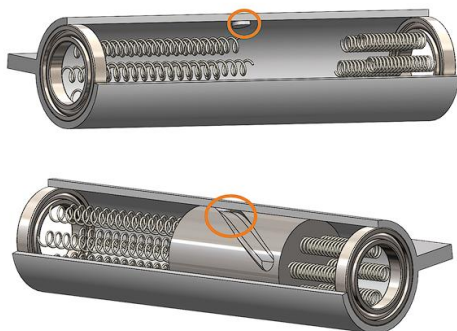


Figure 10. Top: Male slot. Bottom: Connection with female slot

The power to be obtained with the amount of the SMA to be used in the mechanism depends on the weight of the winglet, the forces it is exposed to during flight, the losses of the mechanism due to friction, the difficulty of the SMAs on opposite sides against the movement and the difficulty of the locking mechanism used.

Depending on the power requirement, the number of mechanisms to be used and their dimensions may vary. With these changes, compact and synchronous operation of the mechanism is important. Insulation techniques will be used to keep the SMA springs at the desired temperature. A control mechanism is also required to provide remote control of the mechanism.

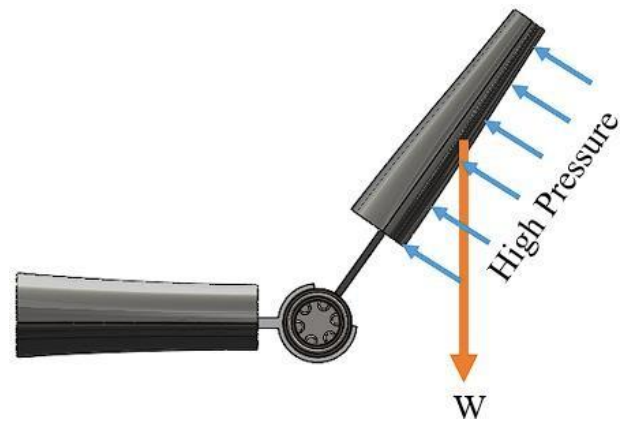


Figure 11. Weight and high-pressure vectors acting on the winglet

Figure 11 displays the forces acting on the winglet. Due to the difficulty of by high pressure due to the airflow during the change of angle of the winglet, the weight of the winglet alone is insufficient to move in reverse. The reason why the SMA springs are used on both sides of the mechanism is that it provides force in addition to weight to overcome this high pressure.

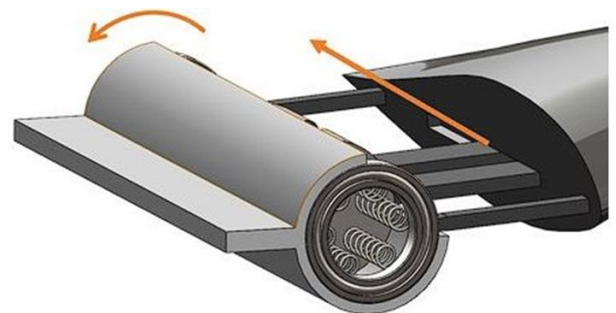


Figure 12. Slot on the winglet not affected by the linear movement of the cylinder as it rotates

While the cylinder in the mechanism converts the linear movement it receives from the SMA springs to rotational movement, its horizontal movement should not be transferred to the winglets. It is desirable to change the angle of the winglet only by vertical movement. Therefore, as shown in Figure 12, there is an open slot in the middle that

connects the winglet to the mechanism, thus, absorbing the horizontal movement.

Advantages:

Mechanical simplicity: The design of the mechanism is simple and does not require a large number of components. This reduces the complexity of the system and makes it easier to manufacture and maintain.

Lightness: The mechanism is lightweight, which is important because any additional weight at the wing tips can create extra momentum and reduce fuel efficiency. The use of small springs and a small number of elements contributes to the lightness of the mechanism.

Cost: The use of a movable blade model reduces the cost of the mechanism. This is because the movable blade model is less expensive to manufacture than a fixed blade model. Additionally, the movable blade model requires less maintenance, which further reduces the overall cost of the mechanism.

Disadvantages:

Power Requirements: The SMA materials require significant amounts of electrical power to heat and activate their shape memory effect. This could result in increased power consumption, especially if the multiple SMA elements are used in the mechanism.

Control Complexity: The SMA-based mechanisms often require precise control systems to achieve the desired movement and angle. Developing and implementing a reliable control algorithm for the mechanism may be challenging, especially if it involves multiple SMA elements and interaction with other control systems in the aircraft.

4 Results and discussion

Results of analyses of the aerodynamic performance of the wing with winglets at different cant angles are presented. They correspond to the Mach number equal to 0.84, which is the cruise speed of a typical civil aircraft. In addition, conclusions were made regarding the state of the aircraft and winglet at different cant angles with respect to the variation of the AOA from 0° to 10° and the subsonic cruise level changes at medium and long distances. As seen in Figure 14, when the cant angle increases, $C_{L_{max}}$ decreases due to the decrease in the pressure difference. In contrast, when the cant angle decreases, $C_{L_{max}}$ increases since the change in the pressure difference due to the winglet also affects the drag, as shown in Figure 13. However, in this case, the reduction in pressure difference has a positive effect on the drag and intensity of the wingtip vortices.

The wing aerodynamic performance will be compared for C_D values at the same C_L value for different positions in the air. Since less C_L is required when the aircraft is on cruise, the average change in C_D between $C_L = 0.1$ and $C_L = 0.2$ was analyzed. Since higher C_L is required for cruise level changes, C_L was taken as 0.35. Results are summarized in Table 5 and 6 for the cruising state ($0.1 < C_L < 0.2$). The highest drag reduction value was observed between 0° and 45°. For cruising level change ($C_L = 0.35$), the optimum result was obtained at cant angle values of 15°. However, 45°

cant angle is also acceptable to create less drag at the same C_L value.

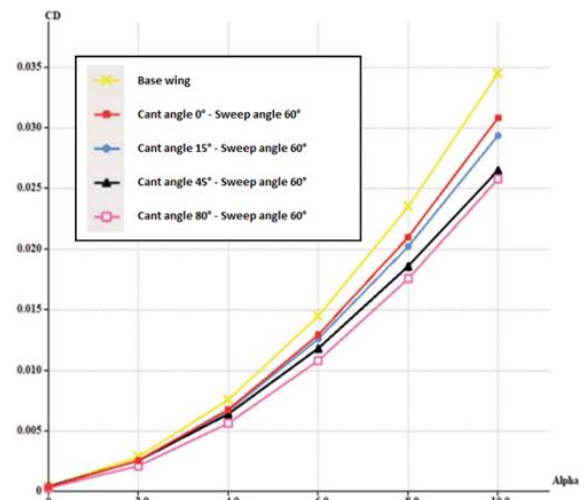


Figure 13. Drag coefficient versus the AOA at the Mach number of 0.84, sweep angle of 60° and different values of cant angle

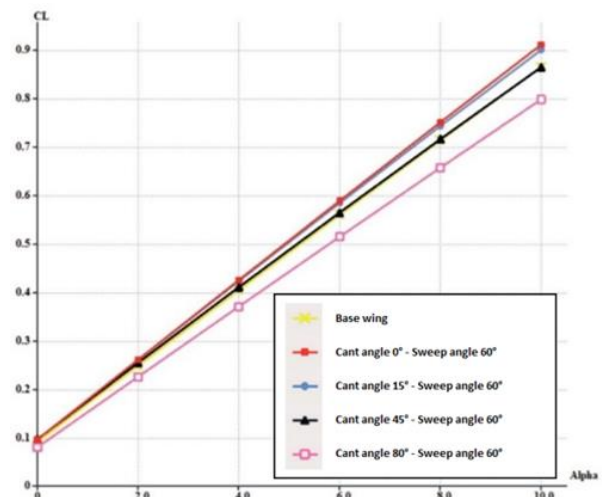


Figure 14. Lift coefficient versus the AOA at the Mach number of 0.84, sweep angle of 60° and different values of cant angle.

Table 5. C_D and drag reduction percentage for a target C_L between 0.1 to 0.2 at the Mach number of 0.84

Winglet cant angle	C_D	3D Wing Drag reduction (%)
0°	0.00218	10.1
15°	0.00216	11.2
45°	0.00252	-3.2
80°	0.00249	-2.0

Table 6. C_D and drag reduction percentage for a target C_L equal to 0.35 at the Mach number of 0.84

Winglet cant angle	C_D	3D Wing Drag reduction (%)
0°	0.00481	17.1
15°	0.00472	18.6
45°	0.00488	15.9
80°	0.00512	11.7

Secondly, the aerodynamic performance analysis for civil aircrafts at constant sweep angles and different cant angles for take-off and landing cases (for $Ma = 0.3$) is presented. In addition, analyses have also been carried out considering the change in the AOA. The AOA value can be up to 20° at take-off, and the change of different parameters (induced drag, lift) was observed for the AOAs up to 20° . The points discussed in this section are similar to those in earlier, since $Ma = 0.3$, compressibility effects and wave drag cannot be mentioned in this stage. Thus, increasing the cant angle leads to a noticeable reduction in C_L . As for the pressure difference, larger cant angles result in decreased pressure towards the wing's tip, contributing to the reduction in C_L . A higher pressure difference during take-off benefits lift force. Comparing configurations, the winglet setup with 0° cant angle exhibits the smallest C_D at low speeds, explaining the use of winglets. Figure 15 demonstrates that increasing the cant angle proportionally increases C_D , with the most significant drag reduction occurring at cant angles between 45° and 15° is mainly because it is the biggest cant angle increase. In Figure 16, at a sweep angle of 60° , C_L remains stable up to 2° AOA, peaking at 20° AOA for the winglet configuration with 0° cant angle. However, the winglet with 80° cant angle minimizes C_D at high AOA, potentially affecting the lift force during take-off (at low Mach numbers and high AOA values).

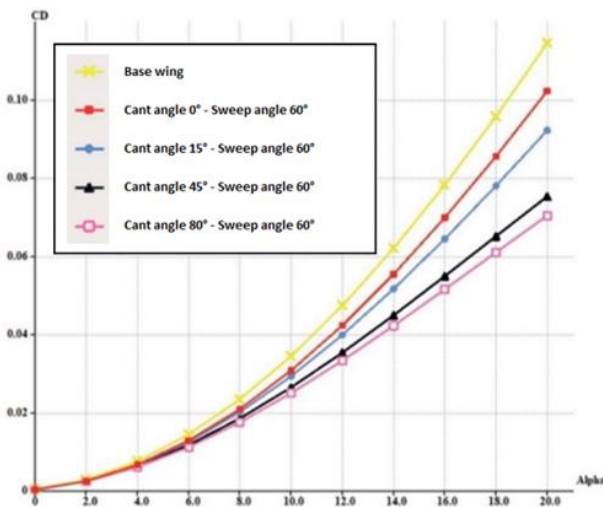


Figure 15. Drag coefficient versus the AOA at the Mach number of 0.3, sweep angle of 60° and different values of cant angle

For the same C_L value for the wing aerodynamic performance at take-off, C_D values were compared. $C_L = 0.6$ is taken because higher C_L is required during the take-off of the aircraft.

According to the results in Table 7, the highest drag reduction for the take-off phase ($C_L = 0.6$) is the configuration where the cant angle is 80° . As it is known, as the cant angle value increases, the C_D value increases in parallel with it and the drag reduction value decreases. In addition, with these results, one of the significant reasons why winglet is used again becomes apparent.

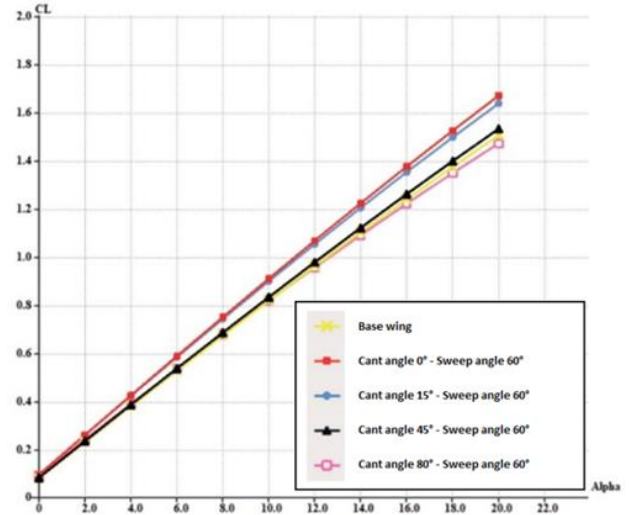


Figure 16. Lift coefficient versus the AOA at the Mach number of 0.3, sweep angle of 60° , and different values of cant angle

Table 7. C_D and drag reduction percentage for a target C_L equal to 0.6 at the Mach number of 0.3

Winglet cant angle	C_D	3D Wing Drag reduction (%)
0°	0.0134	20.238
15°	0.0135	19.643
45°	0.01385	17.56
80°	0.0141	16.07

The analyses performed in this study reveal that no single winglet configuration provides the best drag reduction for a flight phase. Therefore, positioning the winglet cant angle to optimize the aerodynamic performance in different flight phases is the main topic of the conclusion. The proposed winglet positioning is shown in Figure 17 for each flight phase. Suggestions for the optimum configuration for flight phases are summarized as follows:

When the aircraft is on the wheel, it is advised that the cant angle should be 80° to reduce the wingspan and make gate transitions easier.

As seen from the analyses, the 15° cant angle provides more drag reduction for the take-off phase of the aircraft. However, by using a 45° cant angle, more lift-slope can be obtained by sacrificing some drag reduction. This can be used in conditions where it is desired to provide extra lift for the take-off phase of the aircraft. This selection can be decided by considering the take-off distance according to the take-off weight of the aircraft, weather conditions and runway conditions.

The configuration with the highest drag reduction obtained from the analysis cant angle of 15° is preferred since there is no additional lift-slope requirement in the cruise phase of the aircraft a (high Mach number). In addition, although high drag reduction is also achieved at 0° cant angle, it is not suggested to use 0° cant angle as it will cause more root bending moment in the wing at this position. It is proposed that the cant angle should be 45° while changing the cruising altitude. The main reason is to obtain more drag reduction while obtaining more lift slope. A cant

angle of 15° is also acceptable in cases where extra lift-slope is required.

According to the analysis results in the landing phase, a cant angle of 45° is suggested, while an 80° winglet cant angle is not recommended. The reason for this is that it reduces C_{Lmax} .

It is advisable to use an 80° cant angle after landing and hangar entry situations. In this way, the wingspan is reduced to the minimum value, providing gate transitions convenience.

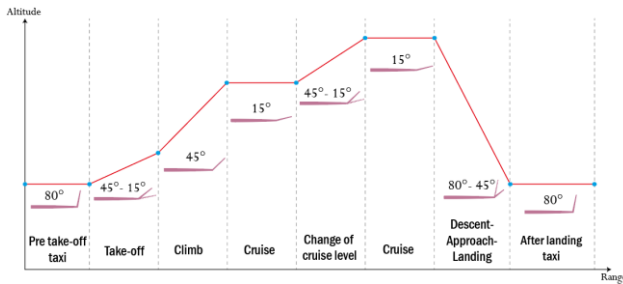


Figure 17. Winglet cant angle configuration during different flight phases

5 Conclusion

This study explores different tilt angle values to reduce optimal drag during various flight stages, using a wing designed to create guides for in-flight transition ailerons. Considering the different AOA values, high and low Mach numbers ($Ma = 0.84$ and $Ma = 0.3$) and the 60° sweep angle, the optimal inclination angle for take-off, climbing, cruising, and landing conditions was determined. As a result of the analyses, it is suggested that the aircraft should have a winglet angle of, 45° - 15° at the time of takeoff, 45° at the time of ascent, 15° while cruising, 45° - 15° during cruise level change and 80° - 45° at the time of landing. at the advanced stages of this study, CFD analysis can be performed, and more accurate data can be obtained. With physical tests (e.g. wind tunnel tests) The cant angle can be determined by comparing the analysis results. For the concept mechanism, the goal is to design an original winglet mechanism that converts linear motion into rotational motion using the tendency of the SMA springs to revert to their former state in a heat-sensitive manner, and a locking system to maintain the cant angle. The optimized design aims to minimize friction losses and provide simplicity and convenience, contributing to the improved SMA-based winglet mechanism. The power requirements of the mechanism can be determined according to the weight that it will lift, and the number of SMAs or the size of the mechanism can be changed.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest

Similarity rate (iThenticate): 15%

References

- [1] E. Torenbeek, *Advanced aircraft design: conceptual design, analysis and optimization of subsonic civil airplanes*. John Wiley & Sons, 2013.
- [2] J. E. Guerrero, D. Maestro and A. Bottaro, Biomimetic spiroid winglets for lift and drag control. *Comptes Rendus Mécanique*, 340, 1–2, 67–80, Jan. 2012. <https://doi.org/10.1016/J.CRME.2011.11.007>.
- [3] I. Kroo, *Nonplanar wing concepts for increased aircraft efficiency*. VKI lecture series on innovative configurations and advanced concepts for future civil aircraft, Stanford University, USA, 2005.
- [4] I. Kroo, Drag Due to Lift: Concepts for prediction and reduction, *Annual Review of Fluid Mechanics*. Palo Alto, 33, 1, 587–617, 2001. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.33.1.587>.
- [5] Air Force Studies Board, and National Research Council, *Assessment of wingtip modifications to increase the fuel efficiency of air force aircraft*. National Academies Press, Washington, DC, 2007.
- [6] R. Faye, R Laprete and M. Winter, Blended Winglets for Improved Airplane Performance, *Aero*, Boeing, (17), January 2002.
- [7] B. S. de Mattos, A. P. Macedo and D. H. da Silva Filho, Considerations about winglet design. 21st AIAA Applied Aerodynamics Conference, 2003. <https://doi.org/10.2514/6.2003-3502>.
- [8] R. T. Whitcomb, A design approach and selected wind tunnel results at high subsonic speeds for wing-tip mounted winglets, NASA Langley Research Center Hampton, Washington, NASA Technical Note TN D-8260, July 1976.
- [9] J. E. Guerrero, M. Sanguineti and K. Wittkowski, Variable cant angle winglets for improvement of aircraft flight performance. *Meccanica*, 55, 10, 1917–1947, 2020. <https://doi.org/10.1007/S11012-020-01230-1>.
- [10] D. Hartl, B. Volk, D. C. Lagoudas, F. Calkins and J. Mabe, Thermomechanical Characterization and Modeling of Ni60Ti40 SMA for Actuated Chevrons. *American Society of Mechanical Engineers, Aerospace Division (Publication) AD*, 281–290, 2007. <https://doi.org/10.1115/IMECE2006-15029>.
- [11] J. Chambers, *Concept to reality: Contributions of the Langley Research Center to US Civil Aircraft of the 1990s*, 2003.
- [12] NASA, *NASA Contribution: Winglets*, 2015. <http://www.nasa.gov/aero/nasa-contribution-winglets.html>, Accessed: 15 November 2022.
- [13] E. Acar, *Precipitation, orientation and composition effects on the shape memory properties of high strength NiTiHfPd alloys*, Thesis, University of Kentucky, UK, 2014.
- [14] K. Otsuka and T. Kakeshita, *Science and Technology of Shape-Memory Alloys: New Developments*. *MRS Bull*, 27, 2, 91–100, 2002. <https://doi.org/10.1557/MRS2002.43>.
- [15] K. Otsuka and X. Ren, *Physical Metallurgy of Ti-Ni-based Shape Memory Alloys*. *Prog Mater Sci*, 50, 5, 511–678, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2004.10.001>.
- [16] T.R. Meling, The effect of temperature on the elastic responses to longitudinal torsion of rectangular nickel

- titanium archwires. *The Angle Orthodontist*, 68(4), 357-368, 1998. [https://doi.org/10.1043/0003-3219\(1998\)068<0357:TEOTOT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1043/0003-3219(1998)068<0357:TEOTOT>2.3.CO;2).
- [17] Y. A. Cengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 8th Edition, Chapter 1 Introduction And Basic Concepts, 2015.
- [18] D. Reynaerts and H. Van Brussel, Design aspects of shape memory actuators. *Mechatronics*, 8, 6, 635–656, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0957-4158\(98\)00023-3](https://doi.org/10.1016/S0957-4158(98)00023-3).
- [19] J. B. Allen, Articulating winglets, U.S. Patent, US5988563A, 23 November 1999.
- [20] J. R. Veile, Wing fold push-pin locking assembly, U.S. Patent, US9469392B2, 19 April 1994.
- [21] R. M. Bray, Winglet, U.S. Patent, US7988099B2, 02 August 2011.
- [22] Boeing Commercial, Video: Boeing 777x folding wingtip. <https://www.boeing.com/777x/reveal/video-777x-FoldingWingtip/>, Accessed December 2022
- [23] B. Barriety, Wing load alleviation apparatus and method, U.S. Patent, US6827314B2, 07 December 2004.
- [24] P. Bourdin, A. Gatto and M. I. Friswell, Aircraft Control via Variable Cant-Angle Winglets, 45, 2, 414–423, 2012. <https://doi.org/10.2514/1.27720>.
- [25] P. Panagiotou, M. Efthymiadis, D. Mitridis and K. Yakinthos, “A CFD-aided investigation of the morphing winglet concept for the performance optimization of fixed-wing MALE UAVS,” *Aerospace Research Central*, 42, 2018. <https://doi.org/10.2514/6.2018-4220>.
- [26] P. Dees and M. Sankrithi, Wing load alleviation apparatus and method, U.S. Patent, US20070114327A1, 24 May 2007.
- [27] A. M. Pankonien, Smart Material Wing Morphing for Unmanned Aerial Vehicles. Thesis, University Of Michigan Library, USA, 2015.
- [28] P. Marks, ‘Morphing’ winglets to boost aircraft efficiency, *New Scientist*, 201, 2692, 22–23, 21 January 2009. [https://doi.org/10.1016/S0262-4079\(09\)60208-6](https://doi.org/10.1016/S0262-4079(09)60208-6).
- [29] NASA, NASA Tests New Alloy to Fold Wings in Flight. <https://www.nasa.gov/aeronautics/nasa-tests-new-alloy-to-fold-wings-in-flight/>, Accessed: 25 December 2022.
- [30] A.P. Mouritz, Titanium alloys for aerospace structures and engines, *Introduction to Aerospace Materials*, Woodhead Publishing Limited, Sawston, U.K., pp. 202–223, 2012. <https://doi.org/10.1533/9780857095152.202>.
- [31] M. Kumar, S. Bal and B. Girish, Proceedings of First Joint International Conference on Advances in Mechanical and Aerospace Engineering, pp. 239, Alliance University, Bengaluru, India, December 2023.
- [32] E. S. Rutowski, Energy Approach to the General Aircraft Performance Problem, *Aerospace Research Central*, 21, 3, 187–195, 2012. <https://doi.org/10.2514/8.2956>.
- [33] Boeing, 737 Airplane Characteristics for Airport Planing. <https://www.slideshare.net/RenzoJoseJuradoRolon/737-66864457/>, Accessed: 06 March 2024.
- [34] A. Thomas, W. Saric, A. Braslow and D. Bushnell, Aircraft Drag Prediction and Reduction. Defense Technical Information Center, France, Technical Report AGARD-R-723, 01 Jul 1985.





Otonom araçlarda derin pekiştirmeli öğrenme yöntemleri ile sollama

Overtaking with deep reinforcement learning methods in autonomous vehicles

Fehim Köylü^{1,*}, Yasin Atılkan²

¹ Erciyes Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 38030, Kayseri, Türkiye

² Ankara Üniversitesi, Yapay Zeka ve Veri Mühendisliği Bölümü, 06830, Ankara, Türkiye

¹ Kayseri Robotik, Otonom Sistemler ve Yapay Zeka Lab., 38030, Kayseri, Türkiye

Öz

Pekiştirmeli öğrenme ile derin öğrenme yaklaşımlarını birleştiren derin pekiştirmeli öğrenme algoritmaları zorlu otonom araç görevlerinde kullanılmaktadır. Öndeki aracı geçme, içerisinde barındırdığı farklı türden alt görevler nedeni ile en zorlu otonom araç görevlerinden biridir. Literatürdeki güncel çalışmalar zorlu görevleri çözmek için müfredat öğrenme yaklaşımını derin pekiştirmeli öğrenme ile kullanmaktadır. Bu çalışmada, özgün olarak oluşturulmuş ortamda, yaygın olarak kullanılan derin Q-ağları, avantaj aktör kritik ve proksimal politika optimizasyonu algoritmaları ile yarısı müfredat öğrenme yaklaşımına uğramış 12 model eğitilmiştir. Modellerin değerlendirilmesinde modellerin eğitim süreci ve modellerin ortamda test edilmesi birlikte kullanılmıştır. Çalışmada, tüm modellerde olmasa da derin Q-ağları ve proksimal politika optimizasyonu yöntemleri ile başarılı modeller eğitilmiştir. Başarılı modeller içerisinde müfredat öğrenimi ile bir derin Q-ağları modelinin performansı artırılarak yaklaşımın olumlu etkisi görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Derin pekiştirmeli öğrenme, Müfredat öğrenme, Otonom araçlar

1 Giriş

Bir otonom aracın insan müdahalesi olmaksızın çok hızlı değişen ve önceden bilinmeyen durumlara sahip trafik ortamında, maddi ve manevi zararları önleyecek şekilde hareket etmesi çok önemlidir. Kiran vd. [1] tarafından yapılan çalışmada bir otonom aracın görevleri, şerit takibi, şerit değiştirme, yol birleştirme, öndeki aracı geçme, kavşak hareketleri ve hareket planlama olmak üzere sınıflandırılmıştır. Bunlar arasında en karmaşık olanlardan biri öndeki aracı geçme problemidir. Bu görev hızlanma, şerit değiştirme ve daha sonra tekrardan geçilen aracın önünde eski şeride geri dönme olmak üzere bir dizi alt görevi içermektedir. Ek olarak bu görev ülkelere ait trafik kuralları ile farklı davranışları da gerektirebilir. Türkiye’de trafik içerisinde öndeki aracı geçme davranışı sol sinyalin verilmesi, şerit kontrolü, sol şeride geçme, öndeki aracı geçme ve sağ şeride geçme davranışlarını bir arada yapılmasını gerektirmektedir [2].

Öndeki aracı geçme problemine yönelik yapılan çalışmalar iki sınıfa ayrılabilir. Bu sınıflar modüler boru hattı yaklaşımları ile uçtan uca öğrenme yaklaşımlarıdır [3]. Ek

Abstract

Deep reinforcement algorithms that combine reinforcement learning and deep learning approaches are used in challenging autonomous vehicle tasks. Passing the vehicle in front is one of the most challenging autonomous vehicle tasks due to the different types of subtasks involved. Recent studies in the literature use the curriculum learning approach with deep reinforcement learning to solve challenging tasks. In this study, 12 models, half of which have undergone a curriculum learning approach, are trained in a uniquely constructed environment with commonly used deep Q-networks, advantage actor critic and proximal policy optimization algorithms. The evaluation of the models is based on both the training process and the testing of the models in the environment. In the study, successful models were trained with deep Q-networks and proximal policy optimization methods, although not for all models. Among the successful models, the performance of a deep Q-network model was improved with curriculum learning, showing the positive impact of the approach.

Keywords: Deep reinforcement learning, Curriculum learning, Autonomous vehicles

bir yaklaşım olarak Chen vd. [4] oyun ortamındaki görüntü verilerini kullanarak evrişimli sinir ağı modellerini doğrudan algı yaklaşımları adını verdikleri yöntem ile eğitmişlerdir.

Modüler boru hattı yaklaşımlarında, görüntü verilerinden gaz, fren ve direksiyon eylem kararlarını verirken yol planlama, araç kontrolü vb. birimleri ayrı olarak ele alınmaktadır. Uçtan uca öğrenmede ise sinir ağları ile görüntü verileri doğrudan eylem kararlarına eşlenmektedir. Bu nedenle otonom bir araçta; gaz, fren ve direksiyon olmak üzere verilmesi gereken kontrol kararları için derin sinir ağlarının pekiştirmeli öğrenme yaklaşımı ile eğitilmesi bir uçtan uca öğrenmedir. Klasik pekiştirmeli öğrenme algoritmalarının aksine derin pekiştirmeli öğrenme yöntemlerinin bilinmeyen durumlara genelleme yetenekleri daha yüksektir. Bu durum öndeki aracı geçme de dahil olmak üzere değişken ortamlarda çalışması beklenen otonom görevlerin çözümünde pekiştirmeli öğrenme ile derin öğrenmenin kullanımını zamanla artırmıştır.

Bu çalışmada, yol şerit tipleri, trafik ışıkları, trafik levhaları, hava durumları, diğer araç ya da engeller vb. faktörler göz ardı edilerek bir otonom aracın yavaş giden

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: fehimkoylu@erciyes.edu.tr (F. Köylü)

Geliş / Received: 22.07.2023 Kabul / Accepted: 28.12.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1331354

diğer aracı geçmesi problemine odaklanılmıştır. İlk olarak özgün bir pekiştirmeli öğrenme ortamının kurulması için kullanılabilecek olan bir uygulama programlama arayüzü (API) kullanılarak bir pekiştirmeli öğrenme ortamı kurulmuştur. Daha sonra müfredat öğrenimi yaklaşımı ile eğitilecek modeller için ilk ortamın kısıtlanmış versiyonu olan alt müfredat öğrenme ortamı ikinci ortam olarak kurulmuştur. Bu iki ortam için ortam dinamikleri tamamen özgün olup pekiştirmeli öğrenme ödül fonksiyonu basit tutularak 3 popüler derin pekiştirmeli öğrenme algoritması derin Q-ağları, avantaj aktör kritik ve proksimal politika optimizasyonu ile oluşturulan modellerinin mevcut problem üzerindeki etkinliği incelenmiştir. Kullanılan algoritmalar hiper-parametre yönünden çeşitlendirilerek aynı algoritma modelleri farklı ayarlarda karşılaştırılmıştır. Daha sonra eğitilen modeller aynı hiper-parametre ayarlarında tutularak müfredat öğrenme yaklaşımı ile eğitilmiş ve seyrek ödül anlarına sahip otonom araç geçme görevinde müfredat öğreniminin performansa etkisi incelenmiştir.

Çalışma sonucunda derin Q-ağları ve proksimal politika optimizasyonu ile eğitilen başarılı modeller, yapılması muhtemel kapsamlı otonom araç çalışmalarında derin pekiştirmeli öğrenme yöntemlerinin kullanılması için motivasyonu artıracaktır. Bu duruma karşın hiper-parametre çeşitlendirmeleri ile aynı algoritma modelleri arasındaki başarımların farklıları, algoritmaların parametre duyarlılığı konusundaki hassasiyetlerini göstermektedir. Bu durum algoritmaların hiper-parametre kırılabilirliği yönünden geliştirebileceği sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Başarılı kararlar alabilen modeller içerisinde bir derin Q-ağları modelinin performansı müfredat pekiştirmeli öğrenme ile belirgin şekilde artırılmıştır. Bu durum yaklaşımın olumlu etkisini gösterse de diğer modeller için başarılı modellerin elde edilememesi müfredat öğreniminde ya da farklı tarzda farklı optimizasyon yaklaşımlarının da kullanılabileceği sonucunu ortaya çıkarmaktadır.

2 Geçmiş çalışmalar

Loiacono vd. [5] TORCS simülöründe araç geçme görevini çözmek için pekiştirmeli öğrenmede tablo tabanlı Q-öğrenme algoritmasını kullanmışlardır. Çalışmada 4 katmanlı bir mimari tanımlamışlardır ve düz ya da virajlı yollar için iki farklı senaryo gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak Q-öğrenme algoritması, iyi sürücülerden birinin uyguladığı sürüş politikasından daha iyi bir performans göstermiştir. Ngai ve Yung [6] tarafından yapılan çalışmada Çok Amaçlı Pekiştirmeli Öğrenme yöntemi önerilmiştir. Yazarlar algoritma olarak Q-öğrenme ve çift eylemli Q-öğrenme algoritmasını kullanarak oluşturdukları modellerin doğru eylem kararları aldıklarını göstermişlerdir. Li vd. [7] yaptıkları çalışma ile araç geçme görevinde uygun politikaları öğrenmek için model oluşturmada Q-öğrenme algoritmasını kullanmışlardır. Oluşturdukları ödül fonksiyonlarında insan sürüş deneyimlerini kullanmışlar ve sonuç olarak Q-öğrenme algoritması ile kural tabanlı yöntemlerden daha iyi performans gösteren modelleri geliştirmişlerdir. Xia ve Han [8] tarafından yapılan çalışmada TORCS simülöründe otonom aracın uygun hızda sürmeyi öğrenmesi ve araç geçme görevlerini

gerçekleştirilmesi için derin pekiştirmeli öğrenme algoritmaları kullanılmıştır. Çalışmada politika gradyan yöntemleri ile değer tabanlı yöntemler karşılaştırılmış ve politika gradyan tabanlı yöntemler daha iyi performans göstermiştir. Ek olarak çalışmada karmaşık sürüş görevleri alt kümelerle ayrılarak “Seçenek Çerçevesi” adı verilen bir yöntem kullanılmış ve sonuç olarak pekiştirmeli öğrenme yaklaşımlarının otonom araç geçmede başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Kaushik vd. [9] eğitim anında ham sensör verilerini de kullanarak derin pekiştirmeli öğrenme tabanlı derin deterministik politika gradyanı (DDPG) yöntemi ile öndeki aracı geçme problemini çözmeyi amaçlamışlardır. Bu çalışmada, çözümü daha basit problemlerden zor problemlere aşamalı olarak ayırıp müfredat pekiştirmeli öğrenme yaklaşımı kullanılarak başarılı sonuçlar alınmıştır. Li vd. [10] tarafından DDPG algoritması kullanarak yapılan bir çalışmada, öndeki aracı geçmek için yeni bir model önerilmiştir. Bu çalışmada otonom aracın yörüngesi üzerinde öndeki araç ve diğer engeller ile olan mesafeleri hesaplanıp hassas matematiksel ölçümler yapılarak pekiştirmeli öğrenme ödül fonksiyonları oluşturulmuştur. Modelin geleneksel algoritmalarından daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Song vd. [11] tarafından yapılan çalışmada müfredat öğrenimi pekiştirmeli öğrenme yaklaşımı çalışma içerisinde kullanılan oyun ortamındaki yapay zekâ modeli ile karşılaştırılmış ve müfredat öğrenimi ile performansın arttığı gözlenmiştir. Liu vd. [12] tarafından yapılan çalışmada otonom aracın öndeki aracı geçmesindeki zorluğun üstesinden gelmek için özgün bir müfredat öğrenme yaklaşımı kullanılmıştır. Esnek aktör-kritik (EAK) yöntemi tabanlı bir mimari oluşturularak TORCS simülöründe yüksek hızda sollama elde etmek için görev iki aşamaya ayrılmıştır. Yapılan ilk eğitimde parkuru hızlı tamamlama üzerine odaklanılmış, daha sonra elde edilen model ikinci eğitim olan parkurda tüm araçların geçilmesinde kullanılmıştır. Bu şekilde ödül seyrekliği sorununun üstesinden gelinerek sonuçların müfredat öğrenme yaklaşımı ile iyileştirildiği gösterilmiştir.

Pekiştirmeli öğrenme karmaşık modellere sahip birçok farklı problemde çevre şartlarına uygun en iyi kontrolü sağlamak amacıyla literatürde kullanılmıştır. Aslan vd. [13] tarafından yapılan çalışmada insansı robotların yürüyüşünde dış kuvvetler karşısında denge kontrolünde, Uc-Cetina vd. [14] tarafından yapılan derleme makalesinde belirtildiği gibi doğal dil işleme alanında yapılan makine çevirisi, dil anlama, metin üretme vb. uygulamalarda kullanılmıştır.

3 Materyal ve metod

Mevcut problemi çözmek için pekiştirmeli öğrenme ortamı ile alt müfredat pekiştirmeli öğrenme ortamının bileşenleri ve tasarımı anlatılacaktır. İki şeritli yolda öndeki aracı geçmek için hızlanma, şerit değiştirme, öndeki aracın dikey eksenine önüne geçilmesi ve aynı şeritte geçilecek aracın önüne geçilmesi ile tamamlanacak şekilde diğer birtakım çalışmalardan farklı olarak tam bir otonom araç geçme görevi tanımlanacaktır.

Çalışmada, tanımlanan mevcut görev üzerinde 3 adet literatürde yaygın olarak kullanılan derin pekiştirmeli öğrenme algoritması kullanılmıştır. Bu algoritmalar iki farklı

hiper-parametre ayarı ile çeşitlendirilerek her bir algoritmadan 2 tane olmak üzere toplam 6 model eğitilmiştir. Aynı modeller müfredat pekiştirmeli öğrenme yaklaşımı ile de eğitilip ek 6 model oluşturulmuş ve toplamda 12 model elde edilmiştir.

3.1 Pekiştirmeli öğrenme

Pekiştirmeli öğrenme, makine öğrenmesinin alt yaklaşımı olarak herhangi bir ortamda bulunan aracının (agent) bir problemi çözmek ya da o ortamda varlığını uygun bir şekilde devam ettirmek için yaptığı eylemlerden aldığı ortam dönütlerine göre kendini eğitmesidir. Pekiştirmeli öğrenme ortamları, Markov karar süreçleri (MDP) kullanılarak modellenirken (S, A, p, R) olarak gösterilmektedir [15]. Bir ortam üzerinde t zaman adımında, aracının bulunduğu durum $S_t \in S$, bu durum içerisinde aracının yapabileceği eylem $A_t \in A$ ve eylemi sonucunda aldığı ödül ise $r \in R$ olarak gösterilmektedir. MDP içerisinde durum – eylem çiftleri için aracının bir sonraki durum s' durumuna r ödülü ile geçme olasılığı ise $p(s', r | s, a)$ olarak gösterilmektedir. Aracının ortam üzerindeki eylemleri seçim tarzı politika olarak adlandırılmaktadır. Aracının politikasına göre durum – eylem dizisi aracı başarılı veya başarısız olana kadar ya da ortam şartlarına kadar belirli bir süre boyunca devam eder. Bu süreç bölüm (episode) olarak adlandırılmaktadır. Aracının nihai amacı bölüm boyunca aldığı ödüllerin toplamı olarak adlandırılan getiriye (return) en büyük yapan politikayı bulmaktır. Getiri formülü **Denklem (1)**'de gösterilmektedir.

$$R_t = \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1}, \quad (1)$$

Getiri hesaplanmasında, sonraki zaman adımlarındaki ödüllerin etkisini azaltmak için γ indirim faktörü olarak kullanılmaktadır.

Makine öğrenmesi uygulamalarında modelleri geliştirmek için kullanılan müfredat öğrenme, zor olan görevlerinden üstesinden gelmek için önce daha basit olan görevleri dikkate almayı temel almaktadır [16]. Bu kavram müfredat pekiştirmeli öğrenme adı ile düşünüldüğünde başarı anları seyrek olan pekiştirmeli öğrenme görevlerinde görev alt aşamalara ayrılmaktadır. Modeller ilk olarak daha basit olan alt görevde eğitilmektedir. Daha sonra eğitilen modeller ana problemi çözmek için tekrardan eğitilmektedirler.

3.2 Derin öğrenme

Doğal bir yapı olarak beyin, içerisindeki sinir hücrelerinin oluşturduğu ağ yapısı ile herhangi bir problem için görmediği durumlara karşı sorun çözmeye yeteneğine sahiptir. Bu yeteneğe yapay zekâ literatüründeki çalışmalara bakıldığında genelleme denmektedir. Genelleme yaparak daha güçlü modeller üretmek amacı ile doğal sinir ağlarının çalışmasını örnek alarak hesaplama yapabilen sinir hücreleri ve bu hücrelerin arka arkaya gelmesiyle çok katmanlı mimari ile matematiksel bir yapı oluşturarak problemleri hiyerarşik bir yapıda çözmeyi amaçlayan makine öğrenmesi alt yaklaşımına derin öğrenme denir [17]. Derin ağlardaki her

bir sinir hücresi ağırlıkları olan bağlantılar ile kendinden önceki birtakım sinir hücrelerine bağlıdır. Önceki katmandan gelen sayısal değerler ve geldiği bağlantının ağırlıkları çarpılarak her bir bağlantı için değer bulunur. Her bağlantının değeri giriş yaptığı sinir hücresi için toplanarak toplam değeri bulunur. Daha sonra bu toplam değeri sigmoid, düzeltilmiş doğrusal birim (ReLU) vb. aktivasyon fonksiyonlarına uğrayarak nihai sonuç değeri diğer katmandaki sinir hücrelerine gönderilmektedir. Literatürde sıklıkla kullanılan ReLU aktivasyon fonksiyonu girişi negatif bir değer ise sıfır değerine eşitlemektedir. Bu fonksiyonun yaptığı işlem **Denklem (2)**'de gösterilmektedir.

$$ReLU(x) = \max(0, x), \quad (2)$$

Sinir hücreleri arasındaki ağırlıklar model sonucunu etkiler ve derin öğrenme modellerinin eğitilmesindeki amaç bağlantılardaki doğru ağırlık parametrelerini bulmaktır. Modeller eğitilirken farklı optimizasyon algoritmaları kullanılmaktadır. Bu algoritmalar; stokastik gradyan inişi, Adam, RMSprop vb. algoritmalar. Adam optimizasyon algoritması derin öğrenme yöntemlerinde yaygın olarak kullanılan algoritmalarından bir tanesidir [18].

Zaman içerisinde belirli amaçlar doğrultusunda birçok sinir ağı çeşitleri tasarlanmıştır. Pekiştirmeli öğrenme yaklaşımı ile en çok kullanılan sinir ağı çeşitleri ise evrişimli sinir ağları (CNN), otokodlayıcılar (auto-encoders) ve tekrarlayan sinir ağlarıdır (RNN) [19]. Evrişimli sinir ağları piksel tabanlı ortamda çalışan modellerin eğitiminde kullanılmaktadır.

3.2.1 Evrişimli sinir ağları

Sinir ağlarının içerisinde evrişim adı verilen işlemi kullanarak özel bir ağ yapısı geliştirilmiştir. LeCun vd. [20] tarafından yapılan çalışma ile oluşturulan LeNet-5 adlı evrişimli sinir ağı mimarisinin görüntü verileri üzerinde başarı göstererek diğer çalışmaların öncüsü olmuştur. Evrişimli sinir ağları, giriş verisi üzerinde işlemler yaparak bu veriyi hesaplama maliyeti açısından daha uygun bir duruma getirirken verinin önemli özelliklerini haritalayan bir yapı oluştururlar. Evrişimli sinir ağlarının temel bileşenleri sırası ile evrişim işlemi, aktivasyon fonksiyonu ve biriktirme (pooling) işlemidir [17].

Evrişim işleminde çekirdek (kernel) ve adım (stride) adı verilen iki parametre kullanılmaktadır. Çekirdek bir matris yapısı olarak giriş verisi üzerinde dolaşmaktadır. Adım parametresi, çekirdeğin giriş verisi matrisi üzerinde yatay ve dikey ekseninde atlama büyüklüğünü belirler. Evrişim işlemi olarak kullanılacak matematiksel yapı **Denklem (3)**'te verilmiştir.

$$S(i, j) = \sum_m \sum_n I(i + m, j + n)K(m, n), \quad (3)$$

$S(i, j)$ evrişim işlemi sonucu oluşan sıkıştırılmış matristeki (i, j) konumundaki sonuçtur. I giriş verisini, K ise çekirdeği temsil etmektedir. Evrişim işlemindeki satır ve sütun indisleri ise sırası ile m ve n harfleri ile temsil edilmektedir. Evrişim işlemi sonrası giriş verisinden çıkan

sonuçlar öznitelik haritası olarak da adlandırılmaktadır. İkinci aşamada ise Denklem (2)'de gösterilen ReLU aktivasyon fonksiyonu vb. bir aktivasyon fonksiyonu veriler üzerinde kullanılmaktadır. Daha sonra hesaplama verimliliği vb. amaçlar için genellikle biriktirme adı verilen işlem ağ mimarisinde kullanılır. Bu işlem ile çıkan öznitelik haritası daha da küçültülmektedir. Biriktirme işlemi için literatürde kullanılan en büyükleri biriktirme veya ortalama biriktirme yöntemleri vardır. Sonuç olarak, evrişimli sinir ağından geçerek işlenen giriş verisi sonraki katmanlara kullanılmak üzere gönderilmektedir.

3.3 Derin pekiştirmeli öğrenme

Pekiştirmeli öğrenmede aracı politikaları, derin öğrenme mimarileri ile temsil edilebilir. Derin sinir ağları MDP çerçevesi içerisinde eğitilmektedirler. Son 10 yıl içerisinde farklı pekiştirmeli öğrenme tarzlarını benimseyen güçlü derin pekiştirmeli öğrenme algoritmaları tasarlanmıştır. Bu kısımda derin Q-ağları (DQA), avantaj aktör kritik (A2K) ve proksimal politika optimizasyonu (PPO) olmak üzere çalışmada kullanılan 3 derin pekiştirmeli öğrenme algoritması anlatılacaktır. Algoritmaların, hangi eylem uzayında çalışabileceği, politika tabanlı veya politikadan bağımsız oluşu, eylem-durum değeri veya avantaj değeri tabanlı iyileştirme yapması açısından birbirine göre karşılaştırması Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Derin pekiştirmeli öğrenme algoritmalarının karşılaştırılması

Özellikler	DQA	AAK	PPO
Fonksiyon	✓	✓	✓
Yakınsaması	✓	✓	✓
Modelden bağımsız	✓	✓	✓
Kesikli eylem uzayı	✓	✓	✓
Sürekli eylem uzayı	-	✓	✓
Politika tabanlı öğrenme	-	✓	✓
Politikadan bağımsız öğrenme	✓	-	-
Durum-Eylem (Q) değeri tabanlı	✓	-	-
Avantaj (A) hesabı tabanlı	-	✓	✓

3.3.1 Derin Q-ağları yöntemi

Mnih vd. [21] tarafından yapılan çalışma ile pekiştirmeli öğrenme aracısının politika öğrenimi için evrişimli sinir ağları kullanımı önerilmiştir. Bu yöntem Watkins ve Dayan [22] tarafından önerilen Q-öğrenme algoritmasını temel almaktadır. Derin Q-ağları (DQA) yönteminde politika olarak kullanılan sinir ağı, ham piksel verilerini girdi olarak alırken ağın çıktısı ise durum – eylem çiftinin değer fonksiyonudur. Bu ağı eğitmek için bir gradyan inişi vb. optimizasyon algoritması ile Q-öğrenme algoritması yaklaşımı kullanılabilir. Optimizasyon sürecinde kayıp fonksiyonunda uygulanan gradyan işleminin hesaplanması Denklem (4)'te verilmiştir.

$$\nabla_{\theta_i} L_i(\theta_i) = E_{s,a \sim \rho(\cdot); s \sim \epsilon} \left[\left(r + \gamma \max_{a'} Q(s', a'; \theta_{i-1}) - Q(s, a; \theta_i) \right) \nabla_{\theta_i} Q(s, a; \theta_i) \right], \quad (4)$$

Bu işlem her bir döngüde hedef değer y kullanılmaktadır. E beklenen değeri, r ödül değerini, γ indirim faktörünü ve Q fonksiyonları ise θ sinir ağı parametrelerine göre eylem – durum değerlerini göstermektedir. Denklem (4) içerisindeki hedef değerin hesaplanması Denklem (5)'te gösterilmektedir.

$$y_i = E_{s' \sim \epsilon} \left[r + \gamma \max_{a'} Q(s', a'; \theta_{i-1}) \mid s, a \right], \quad (5)$$

DQA yönteminin fayda sağlayan özelliklerinden biri de deneyim tekrarı verilen yapıyı kullanmasıdır. Aracının yaptığı eylem, eylemi sonucundaki aldığı ödül ve bir sonraki durumu geçiş (transition) adı verilen yapıları oluştururlar. Birçok geçiş deneyimi deneyim tekrarı belleğinde depolanır ve DQA yöntemi bu geçişleri gradyan güncellemelerinde tekrarlı şekilde kullanılır. Bu şekilde veri kullanımı açısından daha verimli bir yöntem tasarlanmıştır.

Mnih vd. [23] yaptıkları diğer çalışma ile DQA yönteminin farklı bir versiyonunu tasarlamışlardır. Bu çalışmada farklı olarak hedef Q-ağı adı verilen bir yapı kullanılmıştır. Hedef Q-ağı asıl Q-ağından farklı olarak algortmada her adım yerine belirli aralıklarla güncellenmektedir. Bu şekilde hedef değerlerin daha az sıklıkla değiştirilmesi sağlanarak öğrenme süreci verimliliği artırılmaktadır.

3.3.2 Avantaj aktör kritik yöntemi

Mnih vd. [24] tarafından yapılan çalışmada derin pekiştirmeli öğrenmede asenkron olarak çalışan 4 adet yaklaşım gösterilmiştir. Bunlar; tek-adım SARSA, tek-adım Q-öğrenme, n-adım Q-öğrenme ve avantaj aktör kritik yönteminin çok iş parçacıklı asenkron çalışan yöntemleridir. Yöntemler arasında asenkron avantaj aktör kritik (A3K) en kapsamlı ve iyi performans gösteren yöntemdir. Yöntem deneyim tekrarı mekanizmasını kullanmadığı için bellek açısından verimli çalışmaktadır. Çalışmada, deneyim tekrarı mekanizmasının kullanılmamasına karşın benzer bir faydadan yararlanmak için pekiştirmeli öğrenme ortamının birden fazla kopyası çok çekirdekli merkezi işlem birimi (CPU) üzerinde birden fazla iş parçacığı kullanarak aynı anda çalıştırılmaktadır. Bu şekilde CPU donanımını kullanarak grafik işlem birimi (GPU) kullanımından kaçınıldığı için donanım yönünden de avantaj sağlanması yöntemin ayrı bir özelliği olmaktadır.

A3K yönteminde asenkron çalışan iş parçacıklarının senkron çalışması ile avantaj aktör kritik (A2K) yöntemi elde edilmektedir. Burada iki önemli yapı olarak aktör ve kritik vardır. Aktör bir derin sinir ağı olarak aracının politikasını belirleyen fonksiyon, kritik ağı ise mevcut durum değerini belirleyen fonksiyondur. Aktör ve kritik sinir ağlarının parametreleri sırası ile θ' ve θ'' olarak gösterilmektedir. Yönteme göre bu ağ parametrelerini güncellerken kullanılan

gradyan hesaplamaları **Denklem (6)** ve **Denklem (7)**'de verilmiştir.

$$\theta': d\theta \leftarrow d\theta + \nabla_{\theta'} \log \pi(a_i | s_i; \theta')(R - V(s_i; \theta'_v)), \quad (6)$$

$$\theta'_v: d\theta'_v \leftarrow d\theta'_v + \frac{\partial(R - V(s_i; \theta'_v))^2}{\partial \theta'_v}, \quad (7)$$

Burada π politika fonksiyon, R bir bölüm içerisindeki getiri ve $V(s_i; \theta'_v)$ durum s_i için değer fonksiyonudur.

3.3.3 Proksimal politika optimizasyonu

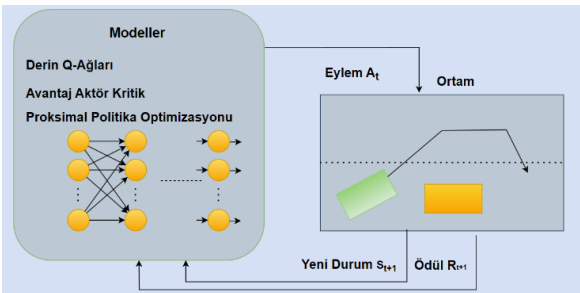
Schulman vd. [25] tarafından yapılan çalışmada ölçeklenebilirlik, veri verimliliği ve hiper-parametre değişikliklerine kırılganlık yönünden mevcut algoritmalara göre daha iyi bir yöntem geliştirilmesi amaçlanmıştır. Proksimal politika optimizasyonu (PPO) yönteminde kırılmış amaç fonksiyonu ile önceki yöntemlerin olumsuz etkilendiği tek seferde büyük politika güncellemelerinin engellenmesi amaçlanmıştır. Kırılmış amaç fonksiyonu **Denklem (8)**'de gösterilmektedir.

$$L^{\text{CLIP}}(\theta) = \hat{E}_t \left[\min(r_t(\theta) \widehat{A}_t, \text{clip}(r_t(\theta), 1 - \epsilon, 1 + \epsilon) \widehat{A}_t) \right], \quad (8)$$

Burada \widehat{A}_t bir t anında eylemi gerçekleştirmenin değeri olarak hesaplanan avantaj fonksiyonudur. Çok fazla değişim farkı olmaması amaçlanan yeni ve eski politikalar arasındaki fark $r_t(\theta)$ olarak temsil edilir. Bu ifadenin hesaplanmasında yeni ve eski politikalar için sırası ile θ ve θ_{old} ağ parametreleri kullanılmaktadır. Kırılma işlemi için ϵ sabit hiper-parametre olarak kullanılır. Sonuç olarak yöntemde bu amaç fonksiyonu ile birlikte tek yinelemede büyük politika değişimleri engellenerek daha istikrarlı bir öğrenme süreci elde edilir.

3.4 Otonom araç geçme ortamlarının kurulumu

Otonom aracın yapması gereken davranışlar hızlanma, şerit değiştirme, öndeki aracı geçme ve güvenli şekilde sağ şeride geri gelmesidir. Otonom aracın ortamdaki MDP yapısı **Şekil 1**'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Öndeki aracı geçmenin MDP çerçevesi

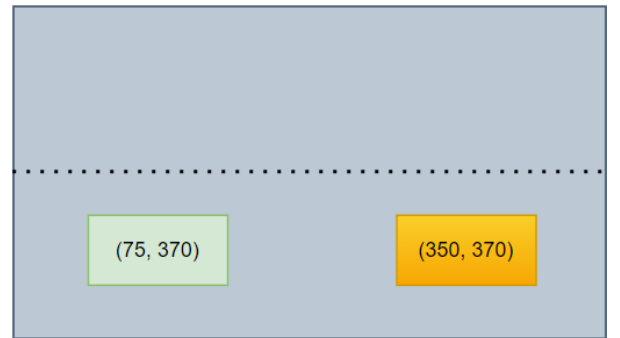
Şekil 1'deki tüm özellikleri sağlayan ana ortam ile mevcut görevi alt aşamaya ayıran müfredat öğrenme alt ortamı olmak üzere iki ortam kurulmuştur. Ortamların kurulumu ve deneylerin gerçekleştirilmesi aşamasında x86_64 mimari ile 16 çekirdeğe sahip AMD Ryzen 7 5800H

işlemci, 16 gigabayt bellek ve 6 gigabayt hafızaya sahip GeForce RTX 3060 Mobile marka GPU özelliklerine sahip bilgisayar kullanılmıştır. Çalışma Python programlama dili ile Anaconda [26] platformu üzerinde gerçekleştirilmiştir. MDP çerçevesi ile ortamların kurulumunda OpenAI tarafından geliştirilen OpenAI GYM [27] API kullanılmıştır. Daha sonra oluşan hata çözme gereksinimleri nedeni ile OpenAI GYM uzantısı olan ve Farama-Foundation tarafından geliştirilen Gymnasium [28] çalışmaya eklenmiştir. Python programlama dili ile piksel tabanlı işlemlerin gerçekleştirilmesi amacı ile OpenCV-Python [29] ve sayısal birtakım işlemlerin gerçekleştirilmesi için NumPy [30] kütüphaneleri kullanılmıştır.

3.4.1 Otonom araç geçme ana ortamının kurulumu

Ortamın tuval boyutu (600, 800, 3) boyutudur. Değerler sırası ile piksel cinsinden yüksekliği, piksel cinsinden genişliği ve kırmızı, yeşil ve mavi renk boyutlarını temsil etmektedir. Hesaplama maliyetini azaltmak için aracının gözlem uzayı (150, 200, 3) olarak yeniden boyutlandırılmıştır.

Ortamın başlangıç konumunda otonom aracı temsil eden araç (x, y) eksenlerinde (75, 370) konumunda, otonom aracın geçeceği araç ise (350, 370) konumunda başlamaktadır. Otonom aracın hedefi 275 piksellik farkı kapatarak diğer aracı geçmektir. Başlangıca ait örnek temsili gösterim **Şekil 2**'de gösterilmektedir.

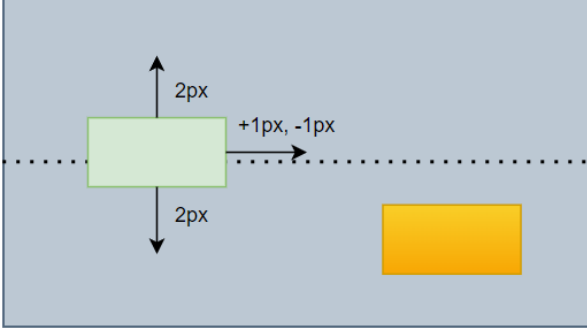


Şekil 2. Otonom araç geçme ortamının başlangıcı

Otonom araç dikey eksen y ekseninde 160 ile 370 konumları arasında hareket etmektedir. Bu büyüklükleri aşacak bir yön değiştirme eylemi gerçekleştirdiğinde kırılma işlemi yapılmaktadır. Yatay eksen x ekseninde ise sınırlandırma 0 ve 740 piksel değerleri arasındadır. Aracının yaptığı her eylem 1 zaman adımına eşittir. Bir bölüm en fazla 500 adım sürmektedir. Geçilmesi gereken araç sadece yatay ekseninde 10 zaman adımında 1 ileri hareket etmektedir. Bir bölüm çarpışma, öndeki aracın başarı ile geçilmesi, bölüm süresinin dolması ya da aracının yatay eksen x ekseninde 740 pikseli aşması ile sona ermektedir.

Ortamda bulunan otonom araç her zaman adımında 5 eylemden sadece 1 tanesini seçerek mevcut hızını ve direksiyon yönünü değiştirebilmektedir. Bu nedenle aracının eylem uzayı kesikli uzaydır. Bu eylemler hızını ileriye doğru 1 piksel artırma ya da azaltma veya direksiyon yönü için sağa ya da sola 2 piksel yön değiştirme şeklindedir. Son eylem ise aracın zaman adımında hiçbir eylemde bulunmamasıdır.

Bölüm içerisinde mevcut hız değeri 1 ve 10 piksel değerleri arasında tutulmaktadır. Bu hız aralıklarının dışına çıkılma durumlarında kırpma işlemi yapılmaktadır. Benzer şekilde direksiyon yönü için sınırlandırma -14 ve +14 piksel değerleri arasındadır. 5 eylemden 4 tanesi Şekil 3'te temsili olarak gösterilmektedir.



Şekil 3. Otonom aracın hız ve yön eylemleri

Otonom araç geçme görevi için her zaman adımında kullanılan ödül fonksiyonlarında $r_{adım}$ değeri -1, çarpışma anında kullanılacak $r_{çarpışma}$ değeri -100, iki aracın yan yana gelme anında kullanılacak $r_{yanyana}$ değeri 100 ve öndeki aracı tam olarak geçme durumunda kullanılacak $r_{sollama}$ değeri ise 200 olarak kullanılmaktadır. Aracının eylemde bulunduğu her zaman adımında çarpışma gerçekleşirse Denklem (9), yan yana gelme durumu gerçekleşirse Denklem (10) veya o adımda araç geçme görevi başarı ile tamamlanırsa Denklem (11) kullanılmaktadır.

$$r_{ödül} = r_{adım} + r_{çarpışma} \quad (9)$$

$$r_{ödül} = r_{adım} + r_{yanyana}, \quad (10)$$

$$r_{ödül} = r_{adım} + r_{sollama}, \quad (11)$$

Her zaman adımında araçlar arasındaki mesafeler (x, y) konumları alınarak ölçülmektedir. Aynı zaman adımında yatay eksen x ekseninde iki araç arasındaki mesafe 110 pikselden daha az ve yatay eksen y ekseninde iki araç arasındaki mesafe 43 pikselden daha az olursa iki araç arasında çarpışma işlemi gerçekleşmiş olur. Araçların yan yana gelmesi durumu ise otonom aracın yatay eksen x eksenindeki konum değerinin sayısal olarak diğer araçtan daha yüksek olması ve otonom aracın dikey eksen y eksenindeki konumunun diğer araçtan 100 pikselden daha büyük bir değerde olması ile gerçekleşir. Bir bölüm içerisinde yan yana gelme durumuna sadece bir defa ödül verilmektedir. Otonom araç için ana hedef olan öndeki aracı geçme durumu ise otonom aracın yatay eksen x eksenindeki konumunun diğer araçtan 50 pikselden daha fazla olması ve dikey eksen y eksenindeki konumları arasındaki farkın 5 pikselden daha az olması ile gerçekleşmektedir.

3.4.2 Müfredat öğrenme alt ortamının kurulumu

Bu ortamda taval boyutu, gözlem ve eylem uzayı, ödül fonksiyonları vb. ana ortam için anlatılan ayarlar aynıdır. Bu ortamın ana ortamdaki farkı, ana hedef otonom aracı geçme

görevinin bu ortamda bulunmaması ve Denklem (11)'in kullanılmamasıdır. Bu ortamdaki nihai hedef iki aracın yan yana gelmesidir. Bu ortamda yan yana geldiğinde bölüm sonlanmaktadır.

3.5 Derin pekiştirmeli öğrenme modellerinin tasarımı

Bu kısımda 3 algoritma için 4'er tane olmak üzere eğitilen 12 modelin hiper-parametre tanımlamaları ve derin sinir ağları açıklanacaktır. Modellerin oluşturulmasında PyTorch çerçevesi tabanlı Stable Baselines3 [31] kütüphanesi kullanılmıştır. Stable Baselines3 derin pekiştirmeli öğrenme algoritmalarının istenilen parametrelerde uygulanmasını sağlayan kütüphanedir.

Yöntemlerin her birinde 2 hiper-parametre ayarı oluşturulmuştur. 2 ayar ile oluşturulan 2 model ana ortamda 1000000 zaman adımı eğitilmiştir. Diğer 2 model ise müfredat öğrenme alt ortamında ilk olarak 500000 zaman adımında eğitilmiştir. Daha sonra eğitilen 2 modelin eğitimine 500000 zaman adımı daha ana ortam üzerinde devam edilerek müfredat öğrenme yaklaşımına uğramış modeller oluşturulmuştur. Sonuç olarak 2 tanesi müfredat öğrenimi yaklaşımına uğramış ve 1000000 zaman adımı boyunca eğitilmiş 4'er adet DQA, A2K ve PPO modelleri oluşturulmuştur.

3.5.1 Derin Q-ağları modellerinin tasarımı

DQA modelleri için iki hiper-parametre ayarı Tablo 2'de gösterilmektedir.

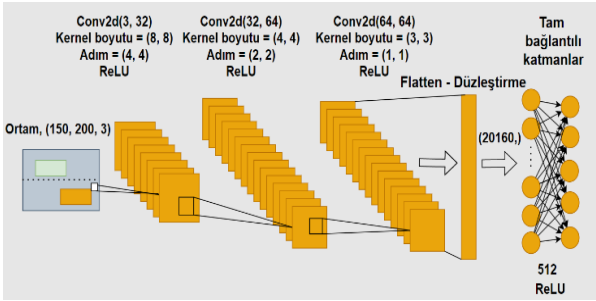
Tablo 2. DQA modelleri için kullanılan 2 farklı ayar

Hiper-parametreler	Ayar 1	Ayar 2
Policy	CnnPolicy	CnnPolicy
Learning_rate	0.00025	0.000001
Buffer_size	50000	50000
Learning_starts	50000	50000
Batch_size	32	32
Tau	1.0	1.0
Gamma	0.99	0.99
Train_freq	4	4
Gradient_steps	1	1
Replay_buffer_kwargs	-	-
Optimize_memory_usage	False	False
Target_update_interval	10000	10000
Exploration_fraction	0.1	0.1
Exploration_initial_eps	1.0	1.0
Exploration_final_eps	0.05	0.05
Max_grad_norm	10	10
Policy_kwargs	-	-
Seed	None	None
Device	cuda	cuda

Tablo 2'deki policy politikayı, learning_rate optimizasyonda her adımda ilerleme büyüklüğünü, buffer_size deneyim tekrarı mekanizmasında depolanacak veri büyüklüğünü, learning_starts öğrenme başlamadan önceki adım sayısını, batch_size gradyan güncellemelerindeki veri topluluğu büyüklüğünü, tau yumuşak güncelleme katsayısını, gamma indirim faktörünü, train_freq modellerin güncellenme sıklığını, gradient_steps her bir güncellemede atılacak olan gradyan güncelleme adım sayısını, replay_buffer_kwargs deneyim tekrarı mekanizması deposu olan

tekrarlama arabelleğine gönderilen parametreleri, optimize_memory_usage tekrarlama arabelleğinin belleği verimli kullanma durumunu, target_update_interval hedef ağı güncellenme sıklığını, exploration_fraction keşif oranı azaltımının zaman dilim aralığını, exploration_initial_eps rastgele eylem olasılığının başlangıç değerini, exploration_final_eps rastgele eylem olasılığının son değerini, max_grad_norm gradyan kırpma için en yüksek değeri, policy_kwargs politika oluşturulurken eklenebilecek parametreleri, seed rastgele üreteç sabit değerini ve device ise kodun çalıştırılacağı donanımı belirlemektedir.

Stable Baselines3 üzerindeki varsayılan derin sinir ağı DQA mimarisi 4 modelde de aynı şekilde kullanılmıştır. Hedef Q-ağı için de mimari aynı olup DQA modelleri için ağı mimarisi Şekil 4'te gösterilmektedir. DQA'da optimizasyon sürecinde varsayılan olarak Adam algoritması kullanılmaktadır.



Şekil 4. DQA modelleri için ağı mimarisi

Şekilde gösterilen ağı yapısında, giriş, çıkış kanal sayıları, çekirdek ve adım parametreleri değiştirilmemiştir [32]. Katmanlar içerisinde ReLU aktivasyon fonksiyonu kullanılmaktadır. Ağı içerisinde giriş verisi tam bağlantılı katmanlar içerisinde kullanılmadan önce (20160,) uzunluğunda vektöre dönüştürülmektedir. Bu dönüşüm için düzleştirme adı verilen katman kullanılmıştır.

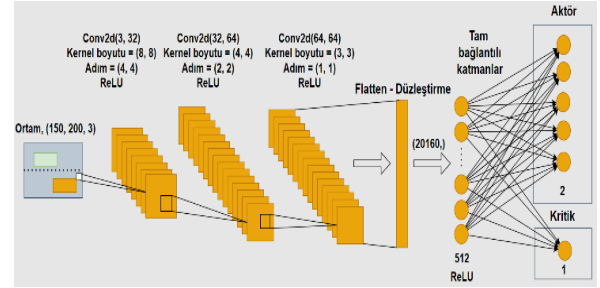
3.5.2 Avantaj aktör kritik modellerinin tasarımı

A2K modelleri için iki farklı hiper-parametre ayarı Tablo 3'te gösterilmektedir. DQA yöntemi ile ortak olan hiper-parametre tanımlamaları olsa da A2K yöntemi için farklı olan hiper-parametreler vardır. Farklı olarak n_envs paralelde çalışan kopya ortamlarının sayısı, n_steps her bir güncellemede alınacak eylem sayısını, gae_lambda avantaj tahmininde önyargı ve varyans arasındaki değişim faktörünü, ent_coef ve vf_coef kayıp fonksiyonu hesaplanırken sırası ile entropi ve değer fonksiyonu katsayısını, use_sde genelleştirilmiş duruma bağlı keşif (gSDE) mekanizmasının kullanılma durumunu, sde_sample_freq kullanılma durumunda gürültü matrisinin kullanılma sıklığını ve normalize_advantage ise avantaj tahmininde normalizasyon yapıma durumunu belirlemektedir.

Stable Baselines3 üzerindeki varsayılan derin sinir ağı A2K mimarisi 4 modelde de aynı şekilde kullanılmıştır. A2K modelleri için ağı mimarisi Şekil 5'te verilmiştir. A2K'de optimizasyon sürecinde RMSprop yöntemi kullanılmaktadır.

Tablo 3. A2K modelleri için kullanılan 2 farklı ayar

Hiper-parametreler	Ayar 1	Ayar 2
Policy	ActorCriticCnnPolicy	ActorCriticCnnPolicy
Learning_rate	0.000001	0.00025
N_envs	1	1
N_steps	32	32
Gamma	0.99	0.99
Gae_lambda	1.0	1.0
Ent_coef	0.0	0.0
Vf_coef	0.5	0.5
Max_grad_norm	0.5	0.5
Use_sde	False	False
Sde_sample_freq	-1	-1
Normalize advantage	False	False
Optimizer:	RMSprop	Optimizer: RMSprop
Policy_kwargs	Alpha:0.99 Eps: 0.00001 Weight decay: 0	Alpha: 0.99 Eps: 0.00001 Weight decay: 0
Seed	None	None
Device	cuda	cuda



Şekil 5. A2K modelleri için ağı mimarisi

A2K'nin evrişimli sinir ağı yapısı DQA modeli ile aynıdır. Farklı olarak aktör ve kritik katmanları son aşamada kullanılmaktadır. Katmanlar içerisinde ReLU aktivasyon fonksiyonu kullanılmaktadır. Aktör ağı ile 5 eylem için eylem değerleri hesaplanırken kritik katmanı ile mevcut durum değeri hesaplanmaktadır.

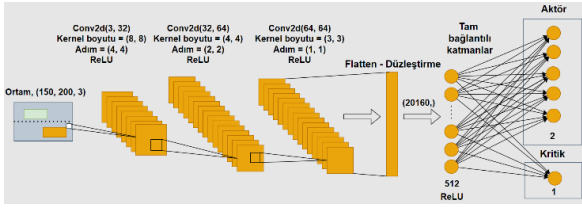
3.5.3 Proksimal politika optimizasyonu modellerinin tasarımı

PPO modelleri için iki farklı hiper-parametre ayarı Tablo 4'te verilmiştir. DQA ve A2K modellerinden farklı olarak bu yöntemde kullanılan n_epochs parametresi kayıp fonksiyonu güncellenirken aynı veri topluluğunun tekrar kullanılma sayısını, clip_range kırpma büyüklüğünü, clip_range_vf değer fonksiyonu için kırpma büyüklüğünü ve target_kl kullanılıyor ise güncellemeler arasındaki KL uzaklığını tanımlar.

Stable Baselines3 üzerindeki varsayılan derin sinir ağı PPO mimarisi 4 modelde de aynı şekilde kullanılmıştır. PPO modelleri için ağı mimarisi Şekil 6'da verilmiştir. PPO'da optimizasyon sürecinde Adam algoritması kullanılmaktadır.

Tablo 4. PPO modelleri için kullanılan 2 farklı ayar

Hiper-parametreler	Ayar 1	Ayar 2
Policy	ActorCriticCnnPolicy	ActorCriticCnnPolicy
Learning_rate	0.000001	0.00025
N_envs	1	1
N_steps	2048	2048
Batch_size	32	32
N_epochs	10	10
Gamma	0.99	0.99
Gae_lambda	0.95	0.95
Clip_range	Sabit fonksiyon	Sabit fonksiyon
Clip_range_vf	None	None
Normalize advantage	True	True
Ent_coef	0.0	0.0
Vf_coef	0.5	0.5
Max_grad_norm	0.5	0.5
Use_sde	False	False
Sde_sample_freq	-1	-1
Target_kl	None	None
Policy_kwargs	-	-
Seed	None	None
Device	cuda	cuda



Şekil 6. PPO modelleri için ağ mimarisi

Buradaki evrişimli sinir ağı, aktör ve kritik mimarisi Şekil 5'te verilen A2K mimarisi ile aynı olup (20160) uzunluğundaki vektör ile tanımlanan veri tam bağlantılı katmandan geçerek aktör ve kritik katmanlarına beslenmektedir. Katmanlar içerisine ReLU aktivasyon fonksiyonu kullanılmaktadır.

4 Bulgular ve tartışma

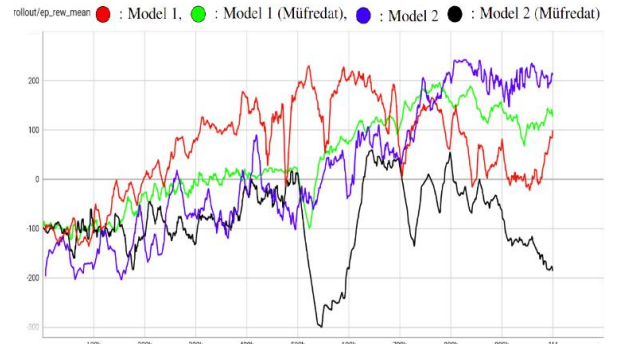
Bu çalışmada oluşturulan 12 derin pekiştirmeli öğrenme modelinin tasarlanan özgün otonom araç geçme senaryosunda değerlendirilmesi için iki ölçüm kriteri kullanılmıştır. Bu iki kriter eğitim ve test aşamasıdır. Eğitim kriteri olarak eğitim aşamasında her 100 bölümün ödül ortalaması verileri TensorBoard [33] görselleştirme aracı ile gösterilmektedir. Test aşamasında ise eğitimi tamamlanmış modeller ana ortamda 10 bölüm çalıştırılmıştır. Bu işlem 10 defa tekrarlanarak toplanan toplam ödül 100'e bölünmüş sonuç olarak her bir modelin test aşamasındaki ortalama ödül değeri belirlenmiştir. Tablolardaki Ayar 1 ile oluşturulan modeller sonuçlarda Model 1, Ayar 2 ile oluşturulan modeller Model 2 olarak belirtilmiştir. Müfredat öğrenimi

yaklaşımı ile eğitilmiş modeller parantez içerisinde belirtilmiştir.

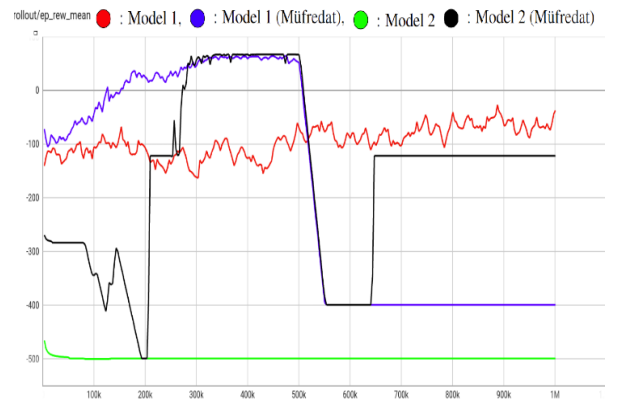
4.1 Eğitim aşaması ödül sonuçları

DQA modelleri için 1000000 zaman adımı boyunca eğitim anında alınan sonuçlar Şekil 7'de gösterilmektedir. Sonuçlara göre Tablo 2'de Ayar 1 ile eğitilen modellerde müfredat öğrenimi yaklaşımının eğitim performansını artırarak daha güçlü bir model sağladığı görülmektedir. Buna karşın Ayar 2 ile eğitilen modellerde müfredat öğrenimi yaklaşımı ile performansın büyük ölçüde düştüğü görülmektedir. Ayar 1 ile Ayar 2 farkını bakıldığında iki ayar arasındaki fark optimizasyon sürecindeki öğrenme oranından kaynaklanmaktadır. Küçük değerdeki öğrenme oranı ile eğitilen model her optimizasyon adımında daha çok öğrenme değişimi yaşayan modelden daha iyi bir eğitim performansı göstermiştir.

A2K modelleri için 1000000 zaman adımı boyunca eğitim sonuçları Şekil 8'de verilmektedir. Sonuçlara göre Tablo 3'te her iki ayarda da ilk 500000 zaman adımında müfredat öğrenme alt ortamında eğitilirken pozitif ödüllere ulaşılmıştır. Daha sonra modellerin eğitimine ana ortamda devam edildiğine 1000000 zaman adımına kadar olan eğitimde modellerin performansı yetersizdir. Eğitim süresince sadece ana ortamda eğitilen modeller hiçbir zaman pozitif ödüllere ulaşamamıştır. Sonuç olarak A2K modellerinin otonom araç görevinde yan yana gelme senaryosunda başarı elde ettiği görülse de ana görevde başarısız olduğu görülmektedir.

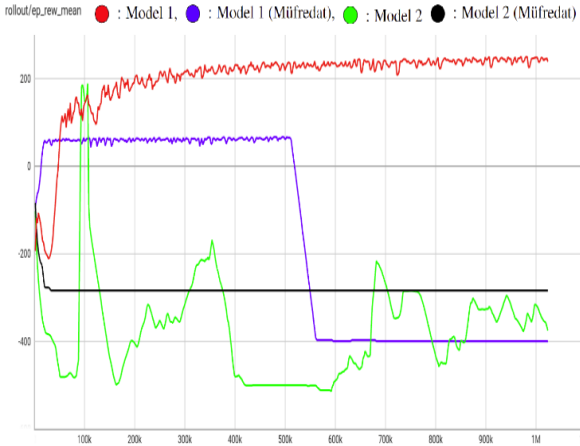


Şekil 7. DQA modellerinin eğitim sonuçları



Şekil 8. A2K modellerinin eğitim sonuçları

PPO modelleri için 1000000 zaman adımı boyunca eğitim anında alınan sonuçlar Şekil 9’da gösterilmektedir. Sonuçlara göre Tablo 4’te Ayar 1 ile eğitilen model başarılı bir eğitim performansı ile ortalama bölüm ödülünde 200 değerinin üzerine çıkmıştır. DQA modelinde olduğu gibi öğrenme oranı daha yüksek olan model büyük bir fark ile başarısız bir eğitim performansı göstermiştir. Müfredat öğrenimi her iki ayarda da başarısız olmuştur. Ayar 1 ile eğitilen model ilk 500000 zaman adımında başarılı olsa da ana ortama geçildiğinde asıl görevde başarısını sürdürmemiştir.



Şekil 9. PPO modelleri eğitim sonuçları

Her üç algortmada en iyi eğitim performansını gösteren modellerin eğitim sonuçları Şekil 10’da gösterilmektedir. Tablo 4’te Ayar 1 ile eğitilen PPO modeli en iyi eğitim performansını göstermiştir. DQA yönteminde bir ayarda performans artırımını sağlasa da en iyi 3 model arasında müfredat öğrenimi yaklaşımı ile eğitilmiş bir model yoktur.

4.2 Test aşaması ödül sonuçları

DQA modelleri için test sonuçları Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. DQA modellerinin test sonuçları

Model 1	Model 1 (Müfredat)	Model 2	Model 2 (Müfredat)
11.53	165.29	202.54	-22.17

A2K modelleri için test sonuçları Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. A2K modellerinin test sonuçları

Model 1	Model 1 (Müfredat)	Model 2	Model 2 (Müfredat)
-58.48	-400.00	-500.00	-122.00

PPO modelleri için test sonuçları Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. PPO modellerinin test sonuçları

Model 1	Model 1 (Müfredat)	Model 2	Model 2 (Müfredat)
248.18	-400.00	-500.00	-284.00

Test sonuçları eğitim sonuçları ile paralellik göstermektedir. Tablo 4’teki Ayar 1 ile sadece ana ortamda eğitilen PPO modeli oluşturulan ödül fonksiyonuna göre yaklaşık olarak alabileceği en yüksek ödülü alarak tam bir otonom araç geçme görevinde başarılı olmaktadır. Ancak, sadece optimizasyon sürecindeki öğrenme oranını artırarak eğitilen diğer PPO modeli mevcut görevde başarısız olmuştur. DQA modelleri içerisinde Tablo 2’deki Ayar 1 ile oluşturulan modeller içerisinde müfredat öğrenimi yaklaşımı ile oluşturulan model bölüm ortalama ödülünü yaklaşık olarak 155 artırmış ve başarılı bir otonom araç geçme performansı göstermiştir. Tablo 6’daki A2K modellerinin test sonuçlarına bakıldığında hiçbir A2K modeli pozitif ödüle ulaşamamış ve tüm A2K modelleri başarısız olmuştur.

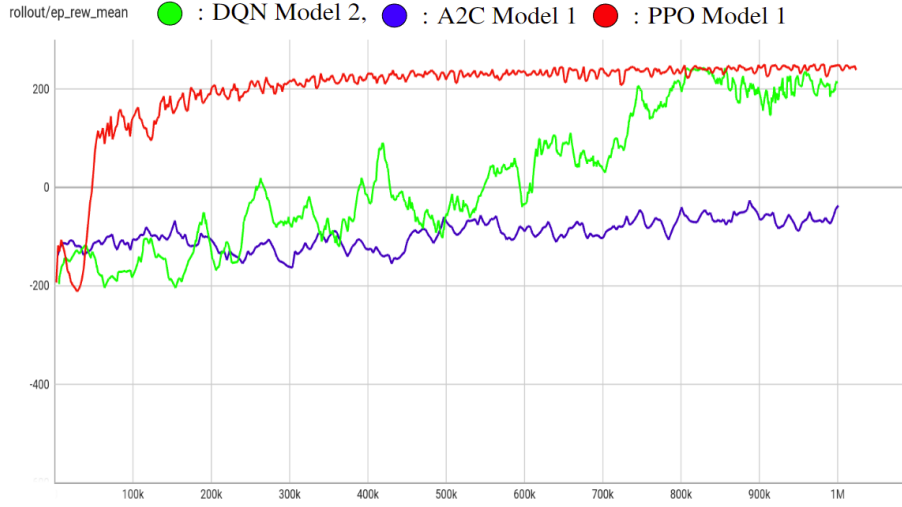
5 Sonuçlar

Otonom araç çalışmaları trafikte insan kaynaklı hatalar sonucu meydana gelen zararların azaltılması ve otonom araçların diğer sayılabilecek faydaları yönünden önemlidir. Bu doğrultuda yapılan çalışmada, ayırık eylem uzayında, otonom araç geçme görevinde, DQA ve PPO yöntemleri ile bazı hiper-parametre ayarlarında başarılı modeller elde ederek yapay zekâ tabanlı yöntemlerin otonom araç görevlerinde kullanılması fikrine katkı sağlanmıştır. Müfredat öğrenme yaklaşımı ile aynı ayarda daha iyi bir DQA modeli elde ederek yaklaşımın olumlu etkisi gözlenmiştir. Kullanılan ödül fonksiyonu keyfi değerler ile oluşturulmuş basit bir ödül fonksiyonudur. Ödül fonksiyonunun otonom araç geçme görevi için iyileştirilmesinin daha iyi modellerin eğitimini sağlayacağı öngörülmektedir.

Öğrenme oranı hiper-parametresinin değiştirilmesi ile aynı algoritma modellerinin başarı oranında büyük değişimler olduğu görülmektedir. Bu sonuç, algoritmaların parametre değişkenliğinden açıkça etkilendiğini göstermektedir.

A2K modellerinin başarısız olması çalışmada incelenmesi gereken diğer bir sonuçtur. GPU yerine CPU donanımının kullanımı veya kopya ortamların sayısı vb. diğer hiper-parametrelerin değişimi ile başarılı A2K modellerinin de eğitilebileceği öngörülmektedir.

Çalışmada tasarlanan ortam yayalar, hava durumu, şerit tipleri, levhalar, diğer araçlar ve farklı engeller vb. trafik ortamının birçok dinamiğinden yoksundur. Bu etmenler ile birlikte ayrıca sürekli eylem uzayı biçiminde davranışın ele alınması ile yapılabilecek daha kapsamlı ortamlarda derin pekiştirmeli öğrenme ve müfredat öğrenme yaklaşımlarının etkinliği ilerleyen çalışmalarda incelenebilecektir.



Şekil 10. Algoritmaların en iyi performans gösteren modelleri

Teşekkür

Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FKB-2019-9388 proje numarası ile desteklenmiştir. Bu çalışmadaki sonuçlar Yasın Atılkan'ın yüksek lisans tezi kapsamında yaptığı deneylere ait verileri içermektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (Turnitin): %8

Kaynaklar

- [1] B. R. Kiran, I. Sobh, V. Talpaert, P. Mannion, A. A. Al Sallab, S. Yogamani, and P. Pérez, Deep reinforcement learning for autonomous driving: a survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(6), 4909-4926, 2021. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3054625>.
- [2] Sürücü Eğitimi. https://www.taksimsurucukursu.com/assets/pdf/surucu_egitimkitabi.pdf, Erişim: 11 Aralık 2023.
- [3] J. Janai, F. Güney, A. Behl, and A. Geiger, Computer vision for autonomous vehicles: Problems, Datasets and State of the Art. 2017, *arXiv: 1704.05519*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1704.05519>.
- [4] C. Chen, A. Seff, A. Kornhauser, and J. Xiao, Deepdriving: Learning affordance for direct perception in autonomous driving. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 2722-2730, Santiago, Chile, 2015.
- [5] D. Loiaco, A. Prete, P. L. Lanzi, and L. Cardamone, Learning to overtake in TORCS using simple reinforcement learning. *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 1-8, Barcelona, Spain, 2010.
- [6] D. C. K. Ngai and N. H. C. Yung, A multiple-goal reinforcement learning method for complex vehicle overtaking maneuvers. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(2), 509-522, 2011. <https://doi.org/10.1109/TITS.2011.2106158>.
- [7] X. Li, X. Xu, and L. Zuo, Reinforcement learning based overtaking decision-making for highway autonomous driving. 2015 Sixth International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP), pp. 336-342, Wuhan, China, 2015.
- [8] T. Xia and Z. Han, Path planning using reinforcement learning and objective data. Master's Thesis, University of Gothenburg, Gothenburg, Sweden, 2017.
- [9] M. Kaushik, V. Prasad, K. M. Krishna, and B. Ravindran, Overtaking maneuvers in simulated highway driving using deep reinforcement learning. 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), pp. 1885-1890, Changshu, China, 2018.
- [10] X. Li, X. Qiu, J. Wang, and Y. Shen, A deep reinforcement learning based approach for autonomous overtaking. 2020 IEEE International Conference on Communication Workshops (ICC Workshops), pp. 1-5, Dublin, Ireland, 2020.
- [11] Y. Song, H. Lin, E. Kaufmann, P. Dürr, and D. Scaramuzza, Autonomous overtaking in gran turismo sport using curriculum reinforcement learning. 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 9403-9409, Xi'an, China, 2021.
- [12] J. Liu, H. Li, Z. Yang, S. Dang, and Z. Huang, Deep dense network-based curriculum reinforcement learning for high-speed overtaking. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 15(1), 453-466, 2022. <https://doi.org/10.1109/MITS.2022.3174410>.
- [13] E. Aslan, M. A. Arserim, and A. Uçar, Development of Push-Recovery control system for humanoid robots using deep reinforcement learning. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(10), 102167, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102167>.
- [14] V. Uc-Cetina, N. Navarro-Guerrero, A. Martin-Gonzalez, C. Weber, and S. Wermter, Survey on reinforcement learning for language



- processing. *Artificial Intelligence Review*, 56(2), 1543-1575, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10205-5>.
- [15] R. S. Sutton and A. G. Barto, *Reinforcement Learning: An Introduction*. MIT Press, 2018.
- [16] Y. Bengio, J. Louradour, R. Collobert, and J. Weston, Curriculum learning. *International Conference on Machine Learning*, pp. 41-48, Montreal, Canada, 2009.
- [17] I. Goodfellow, Y. Bengio, and A. Courville, *Deep Learning*. MIT Press, 2016.
- [18] D. Soydaner, A comparison of optimization algorithms for deep learning. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 34(13), 2020. <https://doi.org/10.1142/S0218001420520138>.
- [19] S. S. Mousavi, M. Schukat, and Enda Howley, Deep reinforcement learning: an overview. In *Proceedings of SAI Intelligent Systems Conference (IntelliSys)*, pp. 426-440, London, UK, 2016.
- [20] Y. LeCun, L. Bottou, Y. Bengio, and P. Haffner, Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE*, 86(11), 2278 – 2324, 1998. <https://doi.org/10.1109/5.726791>.
- [21] V. Mnih, K. Kavukcuoglu, D. Silver, A. Graves, I. Antonoglou, D. Wierstra, and M. Riedmiller, Playing atari with deep reinforcement learning. 2013, *arXiv: 1312.5602*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1312.5602>.
- [22] C. J. Watkins and P. Dayan, Q-learning. *Machine Learning*, 8, 279-292, 1992. <https://doi.org/10.1007/BF00992698>.
- [23] V. Mnih, K. Kavukcuoglu, D. Silver, A. A. Rusu, J. Veness, M. G. Bellemare, A. Graves, M. Riedmiller, A. K. Fidjeland, G. Ostrovski, S. Petersen, C. Beattie, A. Sadik, I. Antonoglou, H. King, D. Kumaran, D. Wierstra, S. Legg, and D. Hassabis, Human-level control through deep reinforcement learning. *Nature*, 518(7540), 529-533, 2015. <https://doi.org/10.1038/nature14236>.
- [24] V. Mnih, A. P. Badia, M. Mirza, A. Graves, T. Harley, T. P. Lillicrap, D. Silver, and K. Kavukcuoglu, Asynchronous methods for deep reinforcement learning. In *International Conference on Machine Learning*, pp. 1928-1937, New York, USA, 2016.
- [25] J. Schulman, F. Wolski, P. Dhariwal, A. Radford, and O. Klimov, Proximal policy optimization algorithms. 2017, *arXiv: 1707.06347*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1707.06347>.
- [26] Anaconda Software Distribution. <https://www.anaconda.org/>, Erişim: 18 Temmuz 2023.
- [27] G. Brockman, V. Cheung, L. Pettersson, J. Schneider, J. Schulman, J. Tang, and W. Zaremba, OpenAI Gym. 2016, *arXiv: 1606.01540*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1606.01540>.
- [28] Gymnasium. <https://gymnasium.farama.org>, Erişim: 18 Temmuz 2023.
- [29] OpenCV-Python. <https://pypi.org/project/opencv-python>. Erişim: 18 Temmuz 2023.
- [30] NumPy. <https://numpy.org>, Erişim: 18 Temmuz 2023.
- [31] Stable-Baselines3. https://www.ai4europe.eu/sites/default/files/2021-06/README_5.pdf, Erişim: 18 Temmuz 2023.
- [32] PyTorch Conv2d. <https://pytorch.org/docs/stable/generated/torch.nn.Conv2d.html>, Erişim: 18 Temmuz 2023.
- [33] Tensorflow TensorBoard. <https://github.com/tensorflow/tensorboard>, Erişim: 18 Temmuz 2023.





Effect of Na₂S+NaOH pre-identification leaching on oxidized refractory Au-Ag ores

Oksitlenmiş refrakter Au-Ag cevherleri üzerinde Na₂S+NaOH ön tanımlama içinin etkisi

Emine Yoğurtcuoğlu^{1,*} , İbrahim Alp² 

¹ Niğde Ömer Halisdemir University, Faculty of Engineering, Department of Mining Engineering, 51240, Niğde Türkiye

² Karadeniz Technical University, Faculty of Engineering, Department of Mining Engineering, University, 61100, Trabzon, Türkiye

Abstract

This study was conducted to investigate the effect of the alkaline sulfide (Na₂S+NaOH) pre-identification process on cyanide leaching performance in oxidized refractory gold-silver ores. The ore has intensive oxide, carbonate, and silicate content, and contains Au/Ag minerals containing electrum, acanthite, and silver-bearing FePbZn Sulphate-Arsenate/Hydroxide minerals together with Fe, Pb, and Zn minerals. Niğde Ulukışla refractory Au/Ag ore has 8-9 g/T gold and 170-180 g/T silver grades. In mineralogical examinations, it was found that these metals were closed in minerals such as iron oxy/oxyhydroxide, calcite, and quartz or neighboring these minerals. In the cyanide soluble process after alkali sulfide preliminary procedure at room temperature, metal extraction yields were obtained as 62% for gold and 7% for silver. It is seen that silver is adversely affected by this process compared to the direct cyanidation process. However, after the hot alkali treatment process, metal extractions improved by approximately 25% of gold and 74% of silver. This increase in yield can be considered as converting Ag-oxyhydroxide into soluble Ag forms as a result of the effect of hot alkaline sulfur leaching on the cyanide process. The most important advantage of this decomposition process is to achieve high metal extraction efficiency in lower alkali concentrations.

Anahtar kelimeler: Na₂S, NaOH, Gold, Silver, Refractory ore

1 Introduction

General extraction methods of gold and silver ores are carried out by physical, physicochemical, and chemical methods, depending on the formation and liberation of the ore [1-2]. Among these methods, hydrometallurgical processes, which are among the chemical methods, are carried out by leaching processes in which these metals are dissolved with the addition of appropriate solvents. The reagents used to obtain these precious metals as a result of dissolution processes are cyanide (CN), thiourea [CS(NH₂)₂], thiosulfate [S₂O₃], thiocyanate [SCN], sulfite [Na₂S, (NH₄)₂S, NaHS], ammonia [NH₃], and solvent reagents such as chloride-bromide-iodide [2-4]. Among

Öz

Bu çalışma, oksitli refrakter altın-gümüş cevherlerinde alkali sülfür ön tanımlama işleminin siyanür liç performansına etkisini araştırmak amacıyla yapılmıştır. Yoğun oksit, karbonat ve silikat içeriğine sahip olan cevherde Fe, Pb ve Zn minerallerinin yanı sıra elektrüm, akantit ve gümüş içeren FePbZn Sülfat-Arsenat/Hidroksit minerallerini içeren Au/Ag mineralleri de bulunmaktadır. Niğde Ulukışla refrakter Au/Ag cevheri 8-9g/t altın ve 170-180g/t gümüş tenörlerine sahiptir. Mineralojik incelemelerde, bu metallerin demir oksit/oksit hidroksit, kalsit, kuvars gibi minerallerin içerisinde kapanım halinde bulunduğu ya da bu minerallerle komşu olduğu tespit edilmiştir. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen alkali sülfür ön işleminin siyanür çözündürme prosesinde metal kazanım verimleri altın için %62 ve gümüş için %7 olarak elde edilmiştir. Direkt siyanürleme işlemi ile kıyaslandığında gümüşün bu işlemde olumsuz etkilendiği görülmektedir. Bununla beraber, sıcak alkali işlem prosesinden sonra, metal ekstraksiyonlarında yaklaşık olarak %25 oranında altında ve %74 oranında gümüşte iyileşme meydana gelmiştir. Bu verim artışı sıcak alkali sülfür içinin siyanür prosesine etkisi sonucu Ag-Oksihidroksitleri çözünebilir Ag formlarına dönüştürmesi şeklinde değerlendirilebilir. Bu bozundurma prosesinin en önemli avantajı ise daha düşük alkali konsantrasyonunda yüksek metal kazanım verimlerinin ulaşılabilmesidir.

Keywords: Na₂S, NaOH, Altın, Gümüş, Refrakter cevher

these reagents, the place of cyanide reagent is of great importance in obtaining 84% of the gold produced in the world. For this reason, the performance of the cyanide leaching to be applied is considered the main criterion in classifying these ores according to their evaluability [5]. This leaching process must be carried out at pHs higher than 9.4 to prevent excessive cyanide loss due to hydrolysis [2]. In the extraction of Au/Ag from ores, ores are divided into two depending on the mineral structure and the ability of the cyanide reagent to reach the metals. Free gold-silver ores are those that have a size of d₈₀<75 µm, and more than 90% Au/Ag can be extracted by dissolution at pH=10-11, with sufficient cyanide leaching concentration for 20-30 hours [6-

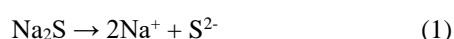
* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: eyogurtcuoglu@ohu.edu.tr (E. Yoğurtcuoğlu)

Geliş / Received: 24.10.2023 Kabul / Accepted: 09.01.2024 Yayımlanma / Published: 15.04.2024

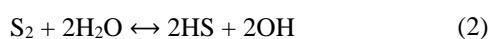
doi: 10.28948/ngumuh.1380496

7]. On the other hand, the sensitivity of the ore structure and composition to cyanide reagent may be faster than Au/Ag. However, by adding more reagents such as cyanide and oxygen, it is possible to extraction gold and silver metals economically. In addition, all ores where these reagents cannot directly reach the mineral structure of the ore, that is, where the conventional cyanidation process fails, are called refractory ores [8-11]. Although it is claimed that around 30-35% of world gold production today is made from refractory ores, this rate of production from the refractory deposits will continue to increase with the consumption of oxidized gold deposits near the surface. Therefore, economical and environmentally friendly extraction methods with physical, biological, chemical, pressure, and thermal pretreatments need to be evaluated in the extraction of these ores [8, 11].

Antimony and arsenic minerals are dissolved from refractory Au/Ag ores containing minerals such as proustite, pyrargyrite, tennantite, tetrahedrite, stibnite, enargite, and jamesonite by alkaline sulfur leaching carried out with sodium-sulfur and sodium hydroxide. During the dissolution process, elements such as Sb and As are dissolved from the decomposed structure, and after this process, precious metals such as Au-Ag are obtained with cyanide and alternative reagents. In the alkali sulfur leaching process, Na₂S decomposes in the aqueous environment as follows (1) [12-15]. In this leaching process, temperature has an important role in metal extraction [16].



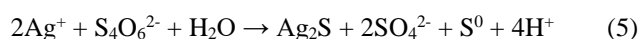
While S²⁻ ion hydrolysis occurs during alkaline sulfur leaching (2), NaOH is added to the medium to prevent the hydrolysis of this ion (3) [12].



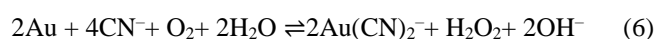
Dissolution of gold in alkaline sulfide systems occurs by sulfides and polysulphides (4) [17, 18]. To extract gold dissolved in alkaline sulfur solutions from the solution, methods such as electrolysis, cementation, precipitation, solvent extraction, and ion exchange are needed [5].



Similarly, silver can dissolve in alkaline sulfur solutions [19]. The reaction is as follows (5):

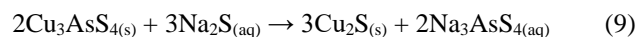
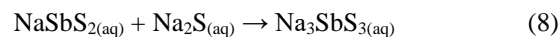
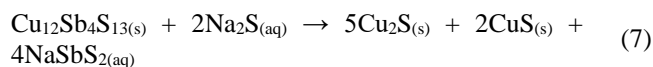


According to the anodic and cathodic half-reactions that took place in alkaline cyanide solutions, the general dissolution reactions of Au are as follows (6) [20-21]:

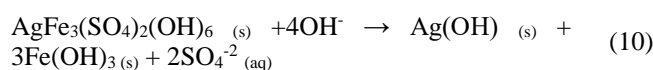


The dissolution reaction in the degradation of silver-bearing antimony (tetrahedrite) (7-9) [14-15] and arsenic

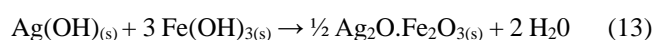
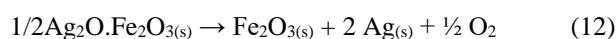
(enargite) (8) [22] sulphosalts by alkaline leaching is as follows:



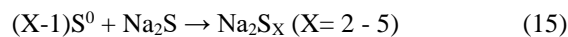
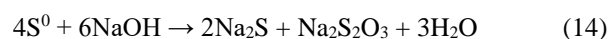
Jarosite structures, especially argentojarosite, react with alkaline pretreatment. After pre-treatment of argentojarosite, silver reacts as AgOH. Many studies have been carried out on the degradation of synthetic argentojarosite in the alkaline environment [23-27]. By alkaline decomposition of this mineral, sulfate ions are removed from the crystal lattice structure, leaving behind a solid gel containing Fe-Ag hydroxide (10) [23, 28].



By cyanidation of AgOH, 2Ag(CN)₂ is obtained. In the alkaline degradation process, the silver in the structure of argento-natrojarosite remains in the solid part [Ag(OH) crystal], and can then be dissolved in cyanide leaching as [Ag(CN)₂]⁻ complex [24-25, 28-29]. In this process, silver is preserved in its degradation products. During the cyanidation process, silver passes into solution as [Ag(CN)₂]⁻. The KOH/KCN medium reaction rate is the same as NaOH/NaCN. Sodium sulfate or sodium chloride increases the reaction rate of this reaction [24]. Metallic silver is obtained by partial decomposition of silver ferritin at 100°C (12, 13) [28].



It is an important finding that acanthite is produced as S₂O₃ in the cyanide reaction (14,15) [30].



Along with the deterioration of the refractoriness of sulfide antimony minerals from refractory ores in alkaline environments, gold losses of up to 13% have been observed in alkaline sulfide leaching. It has been determined that these losses increase even more at high temperatures and high sulfide concentrations. When alkaline leaching in NaOH medium was developed as an alternative to alkaline sulfite leaching, NaOH leaching made it possible to apply it because it consumes less reagent than alkaline sulfite leaching. It has been concluded that in alkaline sulfide leaching, additional investment costs may arise to extract gold losses, and there

may be environmental limitations since alkaline sulfide leaching carries the potential for H₂S gas formation [31].

Niğde Ulukışla Bolkardağ ore is a refractory gold-silver ore that has undergone oxidation [32]. When the reasons for the refractoriness of this ore are investigated, in addition to the presence of precious metals as electrum, the unique structures of silver and gold attract attention [33-34]. It has been determined in mineralogical investigations that gold and silver are found together with these minerals and/or as inclusions within the minerals in the ore, which generally contain oxide, carbonate, and silicate structures as gangue minerals [35]. Iron oxy/oxyhydroxide-containing minerals in the structure were identified as limonite, goethite, and lepidocrosite minerals [36]. It has been observed that especially silver mineral is found together with jarosite/beudantite minerals in the ore structure [37-38].

In this study, the evaluation of alkaline sulfur leaching together with sodium hydroxide in the structures of refractory gold-silver ores that have undergone oxidation was investigated.

2 Material and methods

In the mineralogical investigations of the Niğde-Ulukışla/Bolkardağ Au/Ag ore, it was determined that it is an oxidized ore containing calcite, barite, quartz, and clay minerals, and mostly limonite, goethite, cerussite,

smithsonite, hydrozincite, hemimorphite, and jarosite minerals. In addition, in these investigations, gold was found in the form of native and electrum in small sizes (<24 μm), mostly together with Fe-oxide minerals, while silver was found in acanthite-argentite (Ag₂S) and Ag-containing beudantite (PbFe₃(AsO₄)(SO₄)(OH)₆) [39-40]. It was determined that it was found in the form of jarosite minerals.

The following grains were detected in MLA (modal liberation analysis) analysis determined by XBSE (single X-ray per grain identified in the backscattered electron image). As seen in the legends, gold and silver grains, electrum, acanthite, and silver-bearing FePbZn sulfate-arsenate/hydroxide structures are observed. Some of the classified images of the particles in the plus (Fig. 1-b) and minus (Fig. 1-c) 200μm fractions along with the legends (1-a) are given [5].

Gold and silver were detected from the grains within these determined particles. Figure 2 shows the image of acanthite in +200 micron size, adjacent to silicate and as inclusions in iron oxy-hydroxide.

In Figure 3, electrum and Ag-bearing sulfate-arsenate/hydroxide grains were determined within the particle containing pyrite and iron oxy-hydroxide in size - 200 microns.

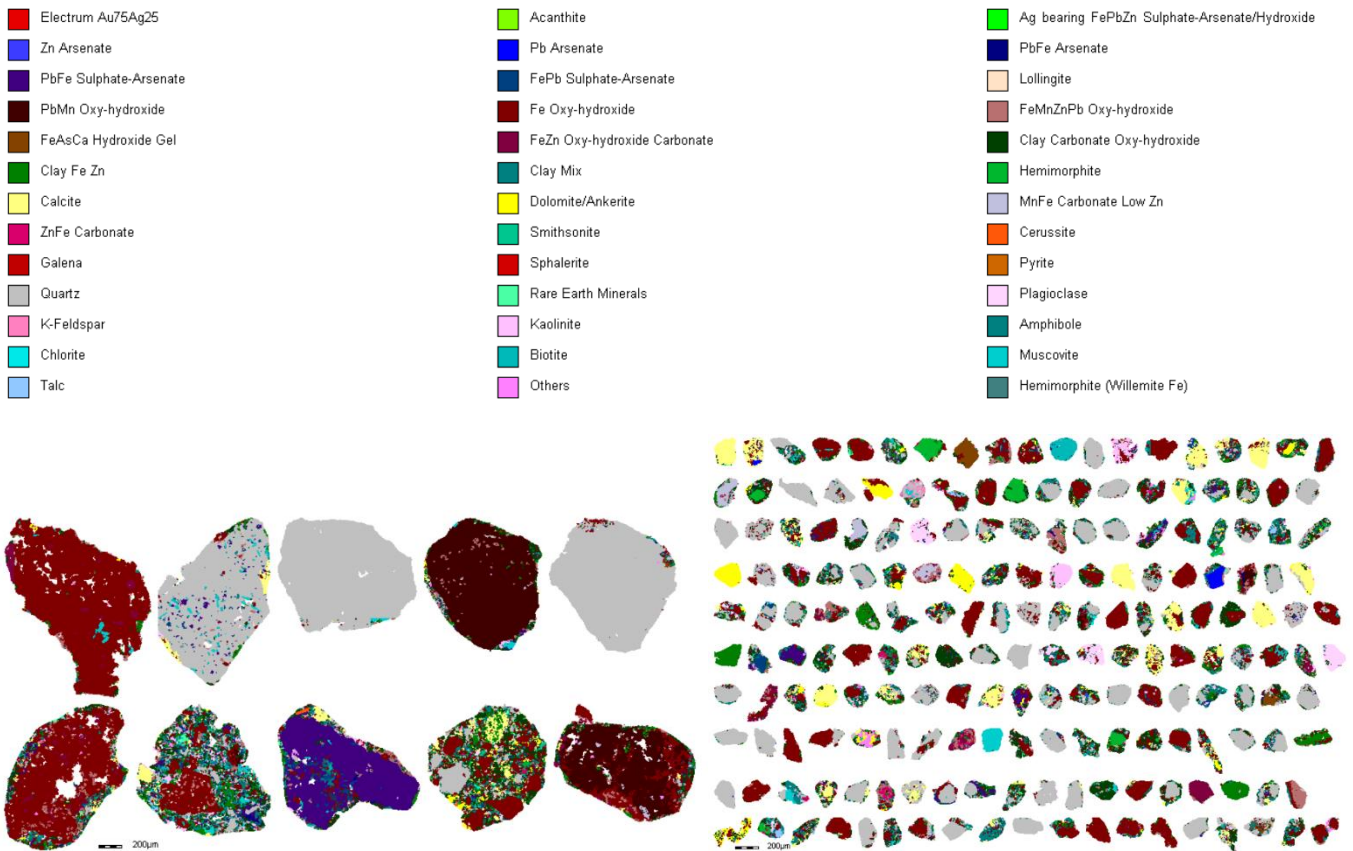


Figure 1. MLA analysis of the ore determined by XBSE (1-a legend (image of above), 1-b individuals classified at +200 μm (image of below-left), 1-c features classified at -200 μm (image of below-right)) [5]

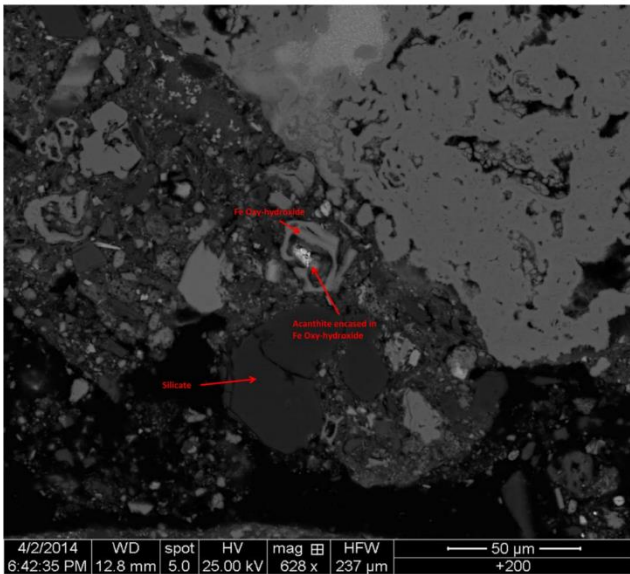


Figure 2. BSE picture displaying acanthite encased in Fe oxy-hydroxide in the +200 micron fraction [5]

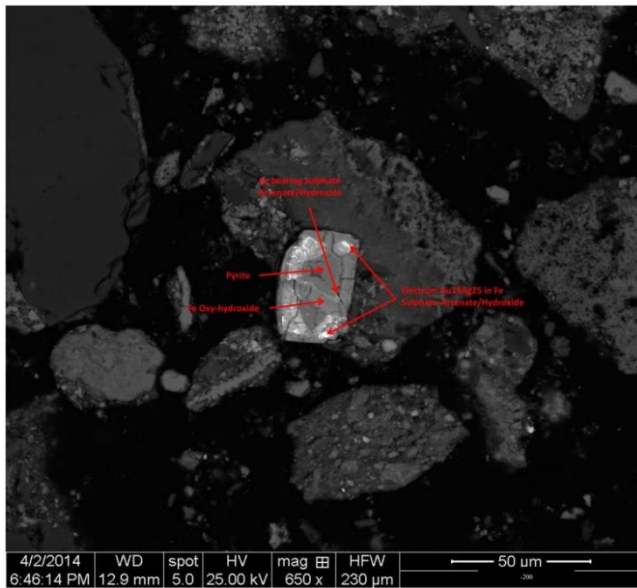


Figure 3. BSE image displaying electrum mixed in Fe oxy-hydroxide around pyrite and Ag-bearing sulfate-arsenate/hydroxide in the vicinity of these two minerals, in the -200 micron fraction [5]

The sieve analysis distribution of the ore obtained after the sample obtained from Niğde Ulukışla Gümüştaş Mining was reduced to -1 mm by drying and crushing (jaw crusher) processes is given in Figure 4.

After 3 minutes of grinding, the raw ore was packaged to be used in experiments. The particle size distribution after grinding is given in Table 1.

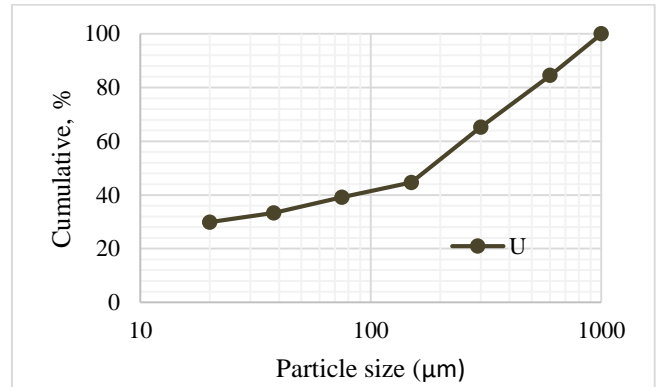


Figure 4. Sieve analysis of the main sample (U: Undersize).

Table 1. 3-minute grinding results

Grinding time min	d ₁₀	d ₅₀	d ₉₀
	μm		
3	1.68	18.77	91.82

Chemical analysis of the ore was obtained by fire assay, ICP-ES (4 acid dissolution), and XRF analyses at the ACME (Canada) Laboratory. In this analysis, it can be seen in Table 2 that there are 2.59% Pb, 4.78% Zn on an element, and 34-35% Fe₂O₃, 22-23% SiO₂, and 5-6% CaO on a compound.

Table 2. Chemical analysis of the test sample

Compound	(%)	Element	(%)	Element	g/T
SiO ₂	22.80	Pb	2.59	Au	8.6
Al ₂ O ₃	4.07	Zn	4.78	Ag	176
Fe ₂ O ₃	34.77	As	1.60	Cu	130
CaO	5.79			Sb	500
MnO	1.35			Ba	300
MgO	1.32				
SO ₃	0.18				

Alkali experiment conditions (Table 3) were determined as 0.5 M Na₂S and 0.5 M NaOH concentrations (pH=9-10), 8 hours leaching time, 1.15 g/cm³ (w/v) pulp density (PD), 25 and 80°C leaching temperatures. The cyanidation process (pH>10.5) was carried out at 1.5 g/L NaCN concentration, 24 hours, 1.30 g/cm³ (w/v) pulp density, and at room temperature, by controlling cyanide and pH.

Table 3. Experimental conditions

Stage	Agent	Time (h)	PD g/cm ³	Temp. (°C)	Conc.
Alkali	Na ₂ S	8	1.15	25/80	0.5M
	NaOH				0.5M
Cyanidation	NaCN	24	1.30	25	1.5g/L

Following dissolution and solid-liquid separation by flocculation, cyanide leaching was applied. After the alkali treatment and cyanide treatments, metal extractions were determined in Perkin Elmer-AA 400 AAS (Atomic Adsorption Spectroscopy) for gold and silver solubility, and

the yields were calculated. In Gümüştaş Mining's Tepeköy R&D Plants, in addition to measurements from leaching liquids, fire assay analysis was also performed on the ore/waste sample. According to the fire assay results of the test sample, gold was found as 9.02 ppm and silver was as 169.9 ppm.

3 Results and discussions

In the study where a hot lime and cyanidation process was applied to Bolkardağ ore, grinding efficiency (0-1-3-5-7-10-30 min) was examined. Following the solid-liquid separation in which alkaline treatment was applied at 80°C, 8 hours, 40kg/t, cyanidation was carried out at 25°C for 24 hours. According to the experimental results, while silver yields remained at lower levels after 5-minute grinding, gold and silver extraction were obtained 88-80% as a result of the experiments [32]. In a different study where grinding was examined (3-10-20-30 min) and there was no pre-treatment application, the cyanidation process was carried out with 1.5g/L NaCN, 24 hours of leaching time, at room temperature, and 25% solids by weight. As a result of the experiments, it was determined that the gold yield was between 77-88% and the silver yield was between 23-43% [36]. Different parameters were studied in the study where the (simultaneous) effect of the potassium hydroxide process on cyanidation was investigated. These parameters are KOH concentration (0.32-2-3.68M), time (38-240-442 min), and temperature (20-57.5-95°C), especially with the increase of parameter values, gold (80-96%) and silver (80-99%) yields were also positively affected [33].

Similar to this study, when the effectiveness of lime performance was examined, the temperature was determined to be in the range of 20-95°C and the duration was 0-16 hours. Especially silver performance started to decrease after 4 hours and 60°C temperature. While gold was obtained at around 98%, silver could be obtained at around 80% [34]. In the study investigating the cyanidation performance after the lime process, the cyanidation time was determined as 0.13-84 hours and the cyanide concentration was 0.13-4g/L. Alkali pretreatment conditions: 8 hours, 80°C, 10% solids, 40 kg/t CaO; and simultaneous cyanidation was carried out at 60°C leaching temperature. It was observed that gold reached up to 97% but silver remained at 76% [35]. In another alkali study, NaOH concentration was examined. Sodium hydroxide process concentrations were also examined in the range of 0.38-3.68 M and temperature in the range of 25-95°C. It was determined that silver was at its highest level in direct cyanidation efficiencies around 0.5h. Although simultaneous NaOH + cyanidation leaching yielded 80% silver and 85% gold in alkaline concentration, it reached up to 99% Au and 90% Ag with increasing temperature [37].

In this study, solid-liquid separation was performed after sodium sulfur alkali treatment. After the alkaline leach liquid was separated for analysis, the washed and dried solid was subjected to cyanidation. After the 24-hour leaching process with cyanide and pH control, the liquid solution was read directly in AAS together with the alkali treatment solution. Like the main sample, the waste sample after the cyanide

treatment was analysed for gold and silver after the fire assay. As a result, the pregnant solution after alkaline treatment, the pregnant leach solution after cyanide treatment, and total metal extractions (confirmed with waste) were obtained.

Silver yields obtained from experiments carried out at 25°C and 80°C leaching temperatures are given in Figure 5. While the dissolution was 1.58% after alkaline sulfur leaching at room conditions, it only increased to 6.52% after cyanidation. While low dissolution efficiencies ($\leq 2\%$) were observed at 80°C leaching temperature, the total efficiency after cyanidation increased up to 80.86%. The direct cyanidation efficiency carried out under the same conditions was obtained as 25-28%. As a result of the cyanidation experiment carried out after the alkaline leaching process under room conditions, silver extraction efficiency was negatively affected.

It was observed that the silver extraction efficiency in 0.0004M $[S_2O_3^{2-}]$ thiosulfate leaching from jarosite type silver compounds in 0.01 M NaOH environment at 30°C was low, but the yield increased with increasing temperature, sodium hydroxide concentration or $[S_2O_3^{2-}]$ concentration. However, in alkaline cyanide leaching, increasing the temperature or increasing the amount of alkali increased the silver metal extraction performance [41]. This situation was also observed in simultaneous sodium hydroxide leaching with low silver extraction at low alkali concentrations and low temperatures [37]. It has been determined that silver extraction in refractory gold ores containing arsenopyrite remains at low levels at low NaOH values, but improvements occur at high concentrations, low solid rates, and high times [42].

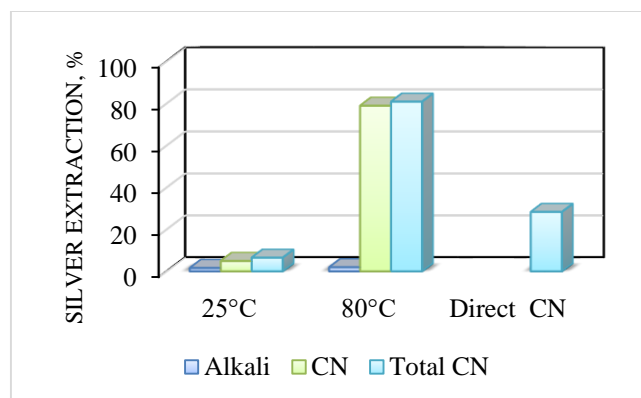


Figure 5. Ag extraction by alkali leaching, cyanide leaching, and total CN leaching (25/80°C)

Gold yields of alkaline sulfur leaching at room conditions and 80°C are given in Figure 6. While Au solubilities after alkaline leaching were around 5-8% at both temperatures, gold extraction efficiencies from the pregnant solutions after cyanidation reached 56-57% in the 25°C experiment and 62% in total. Hot alkaline sulfur leaching cyanidation the pregnant solution increased by 78-79% and up to 87% in total. In addition, the gold performance of direct cyanidation tests was found to be 52.41%. As a result, it is seen that alkaline sulfur leaching at room conditions causes around 9-

10% more gold extraction than direct leaching, and hot leaching has a positive effect on gold performance.

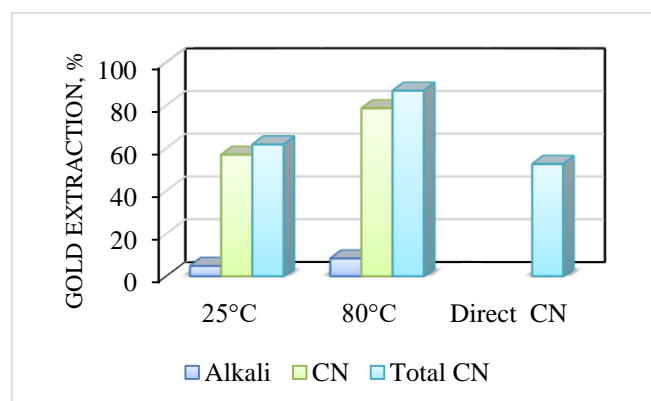


Figure 6. Au extraction by alkaline leaching, cyanide leaching, and total CN leaching (25/80°C)

Sodium hydroxide followed by cyanide and thiosulfate leaching were applied as preliminary treatment of refractory gold ores rich in arsenopyrite. In this sulfur-containing ore, the alkaline environment positively affected the gold extraction [42]. In addition to the different alkaline environments applied to this ore (such as NaOH, KOH, and CaO) being important factors, the effectiveness of hot alkaline pretreatment also had a high impact on gold extraction [33-35, 37].

The experiment performed at 25°C was not effective for either metal. In fact, alkaline sulfur leaching (especially in terms of silver) had a lower efficiency than direct cyanidation. In experiments, it was measured that pH (8.6-9.4) increased with temperature (25-80°C). Sodium sulfur chemical also breaks down into its ions more easily when pH increases. On the contrary, at low temperatures such as room conditions, it is thought that this low-concentration chemical may act as a suppressor in the ore structure at high concentration values such as in flotation [43].

Although the temperature is effective, in a different study, similar values (60-80%) of Au/Ag extractions were obtained from refractory antimony ores where Na₂S and NaOH concentrations were 1-2 M and 3.75 M or 2-4 M and 2.5 M, respectively. Again, in this study, it was observed that temperature increases the extraction efficiency [31].

In the cyanidation process after hot alkaline leaching, the yield increased for both metals. These metal extractions, especially those obtained at higher alkali concentrations in the literature, have also been achieved in alkaline sulfur leaching. This result is also seen as an important advantage in terms of CN leaching. Therefore, the main reason for this change in efficiency can be explained as the further increase in the effectiveness of solvent reagents due to the effect of ambient temperature.

The important reason for the low silver yield can be explained by the fact that the silver mineral content of the ore consists of three different types and the electrum of these minerals is less than the others, but it is more easily liberated (dissolved), and the others are more difficult to liberate (dissolve) [5, 35, 39-40]. Therefore, it is seen that other Ag

minerals are also positively affected by the solubility as the temperature is increased to 80°C.

4 Conclusions

This study was conducted to examine the cyanide process efficiency of the alkali sulfur leaching (Na₂S and NaOH) in metal extraction from oxidized refractory Au/Ag ores. In the mineralogical examinations of the ore, it was determined that the gold and silver minerals consisted of electrum, acanthite, and Ag-bearing FePbZn Sulphate-Arsenate/Hydroxide minerals. These minerals are observed in BSE images in which they are located in many minerals such as iron oxy/hydroxide, quartz, and calcite. The ore also consists of oxide/carbonated content of metals such as lead, zinc, and iron.

In the alkaline pretreatment experiments carried out on the ore with Na₂S and NaOH, 8-hour dissolution was carried out at 25°C and 80°C, and cyanidation was carried out after the solid-liquid separation process. Although the dissolution of silver was low at 25°C, it was found that the achievement efficiency at high temperature reached 81 %. While the dissolution of gold at room temperature was higher than direct leaching, it was determined that the efficiency of metal extractions with the hot sulfur leaching process increased further.

As a result, it was determined that lower alkali sulfide concentrations, especially silver, were significantly effective in metal extractions by increasing cyanide performance with high temperatures.

Acknowledgment

The sample used in this study was obtained from Niğde Ulukışla Gümüştaş Mining, and we would like to thank the plant managers for their support.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 9%

References

- [1] R.B. Bhappu, Hydrometallurgical Processing of Precious Metal Ores. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 6 (1-4), 67-80, 1990. [Doi: 10.1080/08827509008952657](https://doi.org/10.1080/08827509008952657).
- [2] Y. Çilingir, Metallic Ores and Beneficiation Methods (Metalik Cevherler ve Zenginleştirme Yöntemleri) (in Turkish), (Volume 1). D.E.Ü. Faculty of Engineering Press, Izmir, Turkey, 1996.
- [3] C. Abbruzzese, P. Fornari, R. Massidda, F. Vegliò, S. Ubaldini, Thiosulphate leaching for gold hydrometallurgy. Hydrometallurgy, 39(1-3), 265-276, 1995. [Doi: 10.1016/0304-386X\(95\)00035-F](https://doi.org/10.1016/0304-386X(95)00035-F).
- [4] S. Ubaldini, P. Fornari, R. Massidda, C. Abbruzzese, An innovative thiourea gold leaching process. Hydrometallurgy, 48(1), 113-124, 1998. [Doi: 10.1016/S0304-386X\(97\)00076-5](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(97)00076-5).
- [5] E. Yoğurtcuoğlu, Effect of Grinding and Alkali Pretreatment in Before Cyanidation of Oxidized Refractory Au/Ag Ores (in Turkish), PhD thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences,

- Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey, 2017.
- [6] D. Sinadinovic, Z. Kamberovic, B. Vakanjac, Refractory gold ores, characteristics and methods of their procession. VIII Balkan Mineral Processing Conference, Yugoslavia 411–418, 1999.
- [7] J.A.Q. Riguelme, Improved Process Development for Complex Silver Ore Through Systematic, Advanced Mineral Characterisation. PhD thesis, The University of Queensland, Australia, 2014.
- [8] S.R. La Brooy, H.G. Linge, G.S. Walker, Review of gold extraction from ores. *Minerals Engineering*, 7(10), 1213–1241, 1994. [Doi: 10.1016/0892-6875\(94\)90114-7](https://doi.org/10.1016/0892-6875(94)90114-7).
- [9] N. Iglesias and F. Carranza, Refractory gold-bearing ores: a review of treatment methods and recent advances in biotechnological techniques. *Hydrometallurgy*, 34(3), 383–395, 1994. [Doi: 10.1016/0304-386X\(94\)90074-4](https://doi.org/10.1016/0304-386X(94)90074-4).
- [10] D. Lunt and T. Weeks, Process flowsheet selection. *Development in Mineral Processing*, 15, 73–95, 2005.
- [11] N.A. Ampofo, The Impact of Jarosites in BIOX® Product on CIL Processes - A Case Study of AngloGold Ashanti (Obuasi Mine), Master Thesis, Kwame Nkrumah University, 2015.
- [12] M. Delfini, M. Ferrini, A. Manni, P. Massacci, L. Piga, Arsenic Leaching by Na₂S to Decontaminate Tailings Coming From Colemanite Processing. *Minerals Engineering*, 16(1), 45–50, 2003.
- [13] S.A. Awe, Selective Removal of Impurity Elements From Mauriliden Vastra Complex Sulphides Flotation Concentrate, Master Thesis, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 2008.
- [14] S.A. Awe and Å. Sandström, Selective Leaching of Arsenic and Antimony From A Tetrahedrite Rich Complex Sulphide Concentrate Using Alkaline Sulphide Solution. *Minerals Engineering*, 23(15), 1227–1236, 2010.
- [15] S.A. Awe, C. Samuelsson, Å. Sandström, Dissolution Kinetics of Tetrahedrite Mineral in Alkaline Sulphide Media. *Hydrometallurgy*, 103(1–4), 167–172, 2010.
- [16] F. Veglio and S. Ubaldini, Optimisation of Pure Stibnite Leaching Conditions by Response Surface Methodology. *The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection*, 1(2), 103–112, 2001.
- [17] M.I. Jeffrey and C.G. Anderson, A fundamental study of the alkaline sulfide leaching of gold. *The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection*, 3(3), 1303–868, 2003.
- [18] C.G. Anderson and L.G. Twidwell, The alkaline sulfide hydrometallurgical separation, recovery and fixation of tin, arsenic, antimony, mercury and gold. *Proceedings of the 2008 Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology, REWAS 2008* (3), 159–68, 2008.
- [19] A.N. Nikoloski, G.P.O. Malley, S.J. Bagas, The effect of silver on the acidic ferric sulfate leaching of primary copper sulfides under recycle solution conditions observed in heap leaching . Part 1: Kinetics and reaction mechanisms. *Hydrometallurgy*, 173(March), 258–270, 2017. [Doi: 10.1016/j.hydromet.2017.08.020](https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.08.020).
- [20] M.J. Nicol, C. A. Fleming, R.L. Paul, The Chemistry of the Extraction of Gold. In: Stanley, G.C., editor. *The extractive metallurgy of gold*, Nicol, M.J The Extractive Metallurgy of Gold in South Africa, SAIMM, Johannesburg, 831–905, 1992.
- [21] J.O. Marsden and C. Lain. House, *The chemistry of gold extraction*. USA, 2006.
- [22] W. Tongamp and T. Yasushi, A. Shibayama, Arsenic Removal From Copper Ores and Concentrates Through Alkaline Leaching in NaHS Media. *Hydrometallurgy*, 98(3–4), 213–218, 2009.
- [23] A. Roca, F. Patiño, J. Viñals, C. Núñez, Alkaline decomposition-cyanidation kinetics of argentojarosite. *Hydrometallurgy*, 33(3), 341–357, 1993. [Doi: 10.1016/0304-386X\(93\)90071-K](https://doi.org/10.1016/0304-386X(93)90071-K).
- [24] F. Patiño, E. Salinas, M. Cruells, A. Roca, Alkaline decomposition-cyanidation kinetics of argentian natrojarosite. *Hydrometallurgy*, 49(3), 323–336, 1998. [Doi: 10.1016/S0304-386X\(98\)00041-3](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(98)00041-3).
- [25] M. Cruells, A. Roca, F. Patiño, E. Salinas, I. Rivera, Cyanidation kinetics of argentian jarosite in alkaline media. *Hydrometallurgy*, 55(2), 153–163, 2000. [Doi: 10.1016/S0304-386X\(99\)00072-9](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(99)00072-9).
- [26] F. Patiño, M. Cruells, A. Roca, E. Salinas, M. Pérez, Kinetics of alkaline decomposition and cyanidation of argentian ammonium jarosite in lime medium. *Hydrometallurgy*, 70(1–3), 153–161, 2003. [Doi: 10.1016/S0304-386X\(03\)00074-4](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(03)00074-4).
- [27] A. Roca, M. Cruells, F. Patiño, I. Rivera, M. Plata, Kinetic model for the cyanidation of silver ammonium jarosite in NaOH medium. *Hydrometallurgy*, 81(1), 15–23, 2006. [Doi: 10.1016/j.hydromet.2005.09.004](https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.09.004).
- [28] F. Patiño, M.U. Flores, I.A. Reyes, H. Islas, M. Reyes, G. Juárez, Kinetic modeling of the alkaline decomposition and cyanidation of argentojarosite. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 54(4), 216–222, 2010. [Doi: 10.29356/jmcs.v58i1.149](https://doi.org/10.29356/jmcs.v58i1.149).
- [29] E. Salinas, A. Roca, M. Cruells, F. Patiño, D.A. Córdoba, Characterization and alkaline decomposition-cyanidation kinetics of industrial ammonium jarosite in NaOH media. *Hydrometallurgy*, 60(3), 237–246, 2001. [Doi: 10.1016/S0304-386X\(01\)00149-9](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(01)00149-9).
- [30] G. Senanayake, Gold leaching in non-cyanide lixiviant systems: Critical issues on fundamentals and applications. *Minerals Engineering*, 17(6), 785–801, 2004. [Doi: 10.1016/j.mineng.2004.01.008](https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.01.008).
- [31] O. Celep, I. Alp, H. Deveci, Improved gold and silver extraction from a refractory antimony ore by pretreatment with alkaline sulphide leach. *Hydrometallurgy*, 105(3–4), 234–239, 2011. [Doi: 10.1016/j.hydromet.2010.10.005](https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.10.005).
- [32] E. Yoğurtcuoğlu and İ. Alp, The effect of grinding to cyanidation process after hot lime in refractory Au/Ag Ore (in Turkish). *International Participated Cappadocia Geosciences Symposium*, 74–78, 2018.
- [33] E. Yoğurtcuoğlu, İ. Alp, O. Celep, V. Serbest, Applied

- of KOH leaching as pretreatment process for Bolkardağ Au/Ag ore. XV Anniversary Balkan Mineral Processing Congress, Sozopol, Bulgaria, 762–765, 2013.
- [34] E. Yoğurtcuoğlu and İ. Alp, Performance of Cyanidation the Oxidized Au/Ag Ore. 14th International Mineral Processing Symposium, Aydın, Turkey, 723–728, 2014.
- [35] E. Yoğurtcuoğlu and İ. Alp, The Impact of The Cyanidation Parameters on Au/Ag Recovery in Gossan Structured Ores (in Turkish). OHU J. Eng. Sci., 7(3), 1203–1208, 2018. [Doi: 10.28948/ngumuh.502455](https://doi.org/10.28948/ngumuh.502455).
- [36] O. Celep, İ. Alp, V. Serbest, E. Yoğurtcuoğlu, A Preliminary Research on Gold and Silver Recovery from Bolkardağ (Niğde-Turkey) Ore. XIII International Mineral Processing Symposium (IMPS), Muğla, Turkey 605–612, 2012.
- [37] E. Yoğurtcuoğlu, İ. Alp, O. Celep, V. Serbest, Evaluation of Alkaline Pre-Treatment to Improve Cyanidation Performance of Bolkardağ Au/Ag Ore (in Turkish). 23rd International Mining Congress & Exhibition of Turkey, Antalya, Turkey, 959–965, 2013.
- [38] E. Yoğurtcuoğlu and İ. Alp, Characterization of Bolkardağ refractory Au/Ag ore (abstract). 12th International Congress for Applied Mineralogy, Istanbul, Turkey, 67, 2015.
- [39] E. Yoğurtcuoğlu, Investigation of the effect of cyanidation after microwave roasting treatment on refractory gold / silver ores by characterization studies. Physicochem. Probl. Miner. Process. 59(1), 1–14, 2023. [Doi: 10.37190/ppmp/157487](https://doi.org/10.37190/ppmp/157487).
- [40] E. Yoğurtcuoğlu and İ. Alp, The Effect of Roasting on the Mineralogical Structure and Cyanidation Performance of Gossan Type Oxidized Refractory Gold-Silver Ores. Mining, Metallurgy and Exploration, 40(5), 1667–1679, 2023. [Doi: 10.1007/s42461-023-00832-z](https://doi.org/10.1007/s42461-023-00832-z).
- [41] H. Islas, M.U. Flores, J.C. Juárez, M. Reyes, A. Blanco, E.J. Gutiérrez, et al., Silver leaching from jarosite-type compounds using cyanide and non-cyanide lixivants: A kinetic approach. Minerals Engineering, 174(October), 1-12, 2021. [Doi: 10.1016/j.mineng.2021.10.7250](https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.10.7250).
- [42] S.L. Mesa Espitia and G.T. Lapidus, Pretreatment of a refractory arsenopyritic gold ore using hydroxyl ion. Hydrometallurgy, 153, 106–113, 2015. [Doi: 10.1016/j.hydromet.2015.02.013](https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.02.013).
- [43] B. Şentürk, G. Özbayoğlu, Ü. Atalay, Flotation of Lead-Zinc Carbonate Ore of Kayseri-Zamanti District (in Turkish). Türkiye XIII . Madencilik Kongresi, 459–466, 1993.





Design of an Android application for autonomous control of mobile robot

Mobil robotun otonom kontrolü için android uygulama tasarımı

Ahmet Top^{1,*} , Muammer Gökbulut² 

^{1,2} Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Technology, Fırat University, Elazığ, Türkiye

Abstract

In this study, a mobile application (app) for Android devices (ADs) is designed to gather robot data and supply the reference values needed for the autonomous operation of mobile robots intended for various uses. Robot control settings can be supplied with any AD using this application; no further hardware or computer is needed for robot control. Beyond providing manual control, the application also has an interface for autonomous control. It allows the robot to be directed to certain locations by sending it three coordinate points and the approach distance. Furthermore, as the robot moves, real-time data can be received by Bluetooth (BT) on the AD, and the robot's current position is shown on the device's screen. To demonstrate the efficacy of the study, control of the robot with Proportional-Integral-Derivative (PID) and Fuzzy logic controller (FLC), whose prototype are carried out, was performed per the references received from the AD. Meanwhile, real-time data about the robot was gathered on the same AD with the Excel file extension, mailed to the PC, and data graphs were created. The study has demonstrated that ADs may be used for both manual and autonomous control of robots.

Keywords: Android application, MIT App Inventor, Robot control

1 Introduction

Robotics technology has advanced significantly in recent years, along with every other technology. They provide the necessary workforce in sectors where human labor is insufficient or poses harm to human health [1]. While building robots, it's crucial to consider usability and functionality. Because of this, using a smartphone for robot control would be more practical in terms of both cost savings and usability. These days, smartphones are practically an extension of the human body. As a result of this, new smartphones are manufactured daily that are stronger, faster, better at performing, and more durable. Additionally, they greatly simplify human life by including capabilities like Wireless Fidelity, Bluetooth (BT), Global Positioning System, cameras, and different detectors [2]. Applications (app) created using these features provide various functions by interacting with things and taking care of users' individual needs. These devices, made by various firms, run on a variety

Öz

Bu çalışmada, farklı alanlarda kullanılmak üzere tasarlanan mobil robotların otonom kontrolü için gerekli referans değerleri sağlamak ve robot bilgilerini toplamak amacıyla Android tabanlı bir uygulama tasarlanmıştır. Bu uygulama ile robot kontrolü için herhangi bir ek donanıma veya bilgisayara ihtiyaç duymadan herhangi bir Android cihaz ile robot kontrol parametreleri sağlanabilmektedir. Uygulama, manuel kontrolün yanı sıra otonom kontrol için bir arayüz sunmakta ve robotun istenilen hedeflere gidebilmesi için robota üç koordinat noktası ve yaklaşım mesafesini gönderebilmektedir. Ayrıca robot hareket etmeye başladığında Bluetooth üzerinden Android cihaza anlık veri alınabilmekte ve robotun anlık konumu cihaz ekranında koordinat düzleminde görüntülenmektedir. Çalışmanın etkinliğini ortaya koymak amacıyla, prototipi gerçekleştirilen robotun PID ve FL kontrolör ile otonom kontrolü, Android cihazdan alınan referanslar doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda robot hakkında anlık bilgiler Excel dosya uzantısında Android cihaz üzerinde toplanmış, mail yoluyla bilgisayara aktarılmış ve verilerin grafikleri çizdirilmiştir. Çalışma, robotların yalnızca manuel olarak değil, aynı zamanda otonom kontrolünün de Android cihazlar yardımı ile yapılabileceğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Android uygulama, MIT App Inventor, Robot kontrol

of operating systems, including Android, iPhone Operating System and Windows Operating System. Among them, the most widely used operating system is Android. Apps built for Android, therefore, appeal to an expanded audience.

These days, one of the places where Android apps are made is managed by the Massachusetts Institute of Technology (MIT), and it is called MIT App Inventor, which was originally made available via Google Business [3]. A web-based, open-source development tool, MIT App Inventor allows users to design and develop fully working Android apps while giving them a graphical user experience [4, 5]. Google Blockly was the foundation [6] and employs a block-based programming language derived from languages like StarLogo TNG [7] and Scratch [8, 9]. In the last decade, as well as to develop apps such as solutions for automation [10-13], air quality monitoring devices [14], apps for smartphones [15], training [16, 17], wellness [18, 19], monitoring and management of machinery [20-22],

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: atop@firat.edu.tr (A.Top)

Geliş / Received: 13.05.2023 Kabul / Accepted: 10.01.2024 Yayınlanma / Published: 15.04.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1296747

navigation [23] communication [24], agriculture [25], etc., Android apps have been used also for robotic systems [26-42].

A three-degrees-of-freedom reconfigurable articulated robot has been developed by Rajpar et al. They used Arduino for controlling the robot's motions, and their own Android platform to send manual control commands [26]. Utilizing BT and a mobile Android app that enables control of an interactive robot using image or voice, to manually control the mobile robot (MR), Nádvrnk and Smutny did so. Through the app, they were able to observe the robot's proximity to obstacles using the data they collected from the sensors positioned in front of the robot [27]. Aldhalemi et al. used a smartphone and a gyroscope connected via BT to execute control of a two-wheeled self-balancing robot in real-time [28]. By sending voice commands via the Android app to the Arduino through BT, Harhipriya et al. were able to drive a robot vehicle [29]. Erşahin and Sedef used wireless technologies to control a robot remotely. On a tablet, they put the Android app they created. Through Wi-Fi, they transmitted the images to the tablet they were taking with the robot's camera, as well as the values they were setting for the robot's direction and speed to the robot [30]. For environmental safety and security, A robot with a camera, PIR, and gas sensor was remotely controlled via the Internet by Ramya and Palaniappan. In the Microsoft Visual Basic interface they created, they can take camera pictures and manually operate the robot to detect gas leaks and unlawful live entry [31]. An Android smartphone app was used by Meteab et al. to drive a robot vehicle [32]. To gauge temperature, humidity, and carbon monoxide levels in mines with hazardous and challenging working circumstances, Quadri et al. utilized a 3D printer to make a robot. To control this robot, an Android app has been created. When the measurement results were seen on a smartphone, they showed 100% accuracy up to a distance of 10 m [33]. Papcun et al. used BT and a Wi-Fi interface to connect the mobile robot Khepera III to a mobile smartphone. They performed face recognition by transferring the photo they captured with the robot's camera to the mobile device [34]. A powerful, affordable Robotic vacuum that can be operated by mobile devices was designed and produced by Eren and Doğan. They created an Android app so that the robot could be controlled remotely. With the app, the brush motor and vacuum may be operated while the robot is moving [35]. Using the Robot operating system (ROS), Kırılı et al. created mobile robot operations and ADs after mapping the environment with a six-wheeled mobile robot. The camera image and the computed map data are sent back to the device by the guided robot using the AD [36]. In a study conducted by Molnar et al., a mobile robot that stands on two wheels to give balance was designed and controlled. They used the ESP8266 microcontroller to carry out PID control. They gave users control over the mobile device and the PC via the web interface by creating a mobile app with MIT App Inventor [37]. For the Robosoccer game, Varga et al. created a mobile app that uses an accelerometer to control movement and direction by pairing players 1 and 2 via BT [38]. In the study in [39], the robot was operated by BT by projecting the

Android phone's screen onto the computer using the Mobizen program.

When the studies in the literature are analyzed, it is clear that simple apps have only been created for manual control or that ready-made apps are utilized to operate robots. Any app such as sending reference values to the robot for autonomous control, collecting real-time data, and displaying a graph of the robot's position on an AD, has not yet been created. Due to this, a mobile robot with four wheels whose prototype has been realized has been both autonomously and manually controlled in this study using an Android app that transfers data between the Android phone and the robot. MIT App Inventor's creator and blocking editor are used to create the interface and code of the app. Three separate reference points and approach distances can be given for the robot to travel to more than one target point. Additionally, information regarding how close to these locations the robot should get can be given over the same screen. Following the transmission of these references to the robot, data on the robot's linear speed, angular speed, and instantaneous wheel speed are transferred to the AD, where an instant graph is drawn and the data is gathered in an Excel file for transfer to another environment. To demonstrate the effectiveness of the app, the requested data was sent via the app to the mobile robot, whose position and speed control were carried out with PID (proportional-integral-derivative) and fuzzy logic controllers (FLC). The data received from the robot was collected as stated and stored on the device. It was discovered that the data transmission was carried out in both directions without any issues and that the robot control was available for the desired references after these data were sent to the MATLAB software, performance graphs of the robot were generated, and results were reviewed.

2 Material and method

2.1 MIT App Inventor

MIT App Inventor was originally made available by the Google firm and is now managed by MIT [43]. The design interface and the block editor are its two components. The area where screens and content are developed is the design interface seen in Figure 1.

Below are the sections of the design interface and their respective tasks [43]:

- In Palette: This is where the viewer area's components are inserted using the drag-and-drop approach.
- Designer: It's utilized to access the design space.
- Properties: This section allows you to change the component properties.
- Viewer: This section demonstrates how the components will be shown.

The block editor, depicted in Figure 2, is a workspace where programmers may graphically change their app's logic using blocks to describe the software [44].

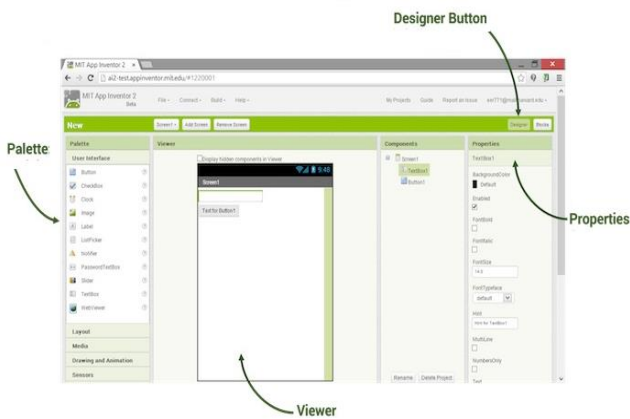


Figure 1. MIT App Inventor design interface

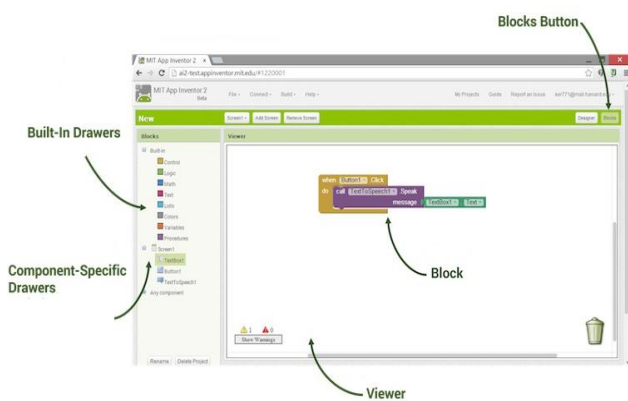


Figure 2. MIT App Inventor block editor

The following are the sections and their functions in the block editor interface:

- **Component-Specific Drawers:** This is the section that contains the code blocks that can be applied to the components on the design screen.
- **Block-In Drawers:** This is the section where the general code blocks are located.
- **BlocksButton:** It is the button to open the block editor.
- **Blocks Viewer:** It is the area where the code blocks can be dragged and dropped.
- **Block:** Code blocks used for software [45].

MIT App Inventor has been applied to numerous apps in recent years, including systems for automation [46], intelligent toggles [47], games and tests [48], smart home management [49-52], and teaching [53].

2.2 Mobile robot

The mobile robot, which will be controlled with the Android app, has a 4-wheel construction with a differential driving mechanism, each wheel powered by a 12V DC motor. Figure 3 shows the prototype of this mobile robot as well as its 3D designs.

Two Sparkfun Monster Moto Shields with PWM control are used to control the motors' speed. The Arduino Due microcontroller is sending these PWM values. Reference and approach distance values sent from the designed Android app are sent to Arduino via BT 4.0 HM-10 module. According to these transferred values, the autonomous

control of the robot is performed. In addition, while the robot is in motion, the robot's data is transferred to the AD via the same BT module, and the instant motion graph of the robot is drawn on the AD screen and the data is collected in the Excel file at the same time. Figure 4 shows the design of the architecture of these procedures.



Figure 3. Mobile robot (a) 3D drawing view and (b) Realized view

2.3 Control software

While manual control of the robot is carried out according to PWM values without the need for any algorithm, PID and fuzzy logic algorithms are used for autonomous control.

PID controllers, sometimes referred to as proportional, integral, and derivative (PID) controllers, are widely used to control DC motor speed. In nonlinear control systems, the PID controller is thought to be the technique that is used the most [54]. It provides the most straightforward and effective solution for a variety of control issues, addressing both steady-state and transient reactions. Equation (1) "gain notation" is typically used to write the transfer function.

$$T(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s \quad (1)$$

Where K_i is the integral gain, K_d is the derivative gain, and K_p is the proportional gain. In this study, it is used to control the reference speed values given to the motors.

As shown in Figure 5, the fuzzy logic controller (FLC) is a control algorithm that generates outputs that can be utilized in the physical world after processing input data that is extracted from the physical world and whose value is known.

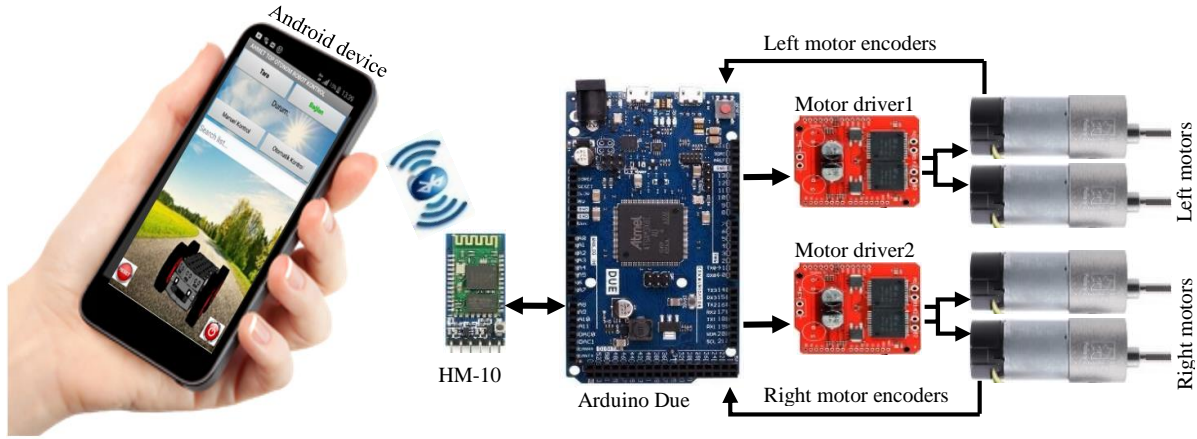


Figure 4. Robot control architecture

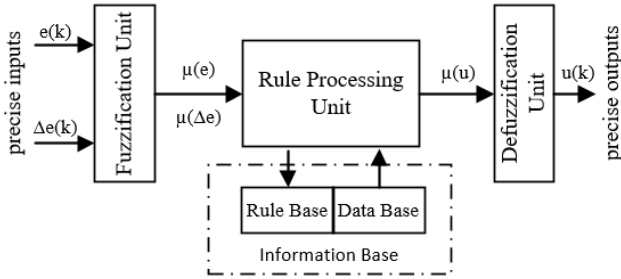


Figure 5. The general structure of the FLC

This control scheme consists of four key parts. these: the rule basis, the inference, the defuzzification units, and the fuzzification unit. Mamdani-type fuzzy logic was employed in this study to execute position control and path planning following the destination coordinates given to the robot by the Android app. The controller has two input variables and two output variables. As input variables, the distance error and angle error to the coordinate point where the robot should move are given. The output variable is the linear velocity and angular velocity values that the robot must achieve instantaneously.

When the general workflow diagram in Figure 6 (a) is examined, the position and angle error values found by first taking the difference between the reference position information coming from the AD and the current position information are applied as input to FLC. Reference motor speeds are calculated by substituting the reference linear and angular velocities of the robot obtained from the output of this controller into the inverse kinematic equations given in Equations (2-3). In line with these speeds, instantaneous robot speeds are calculated again with the forward kinematic equations in Equations (4-5) by utilizing the instantaneous speed information of the PID-controlled DC motors and these are converted into position information.

$$w_L = \frac{1}{R} \cdot (V - W \frac{L}{2}) \quad (2)$$

$$w_R = \frac{1}{R} \cdot (V + W \frac{L}{2}) \quad (3)$$

$$V = \frac{R}{2} \cdot (w_R + w_L) \quad (4)$$

$$W = \frac{R}{L} \cdot (w_R - w_L) \quad (5)$$

3 Android application

The MR is designed to be controlled in two different ways: manually and autonomously, so the Android app interface is divided into three sections to reduce complexity and provide visibility. The initial screen, the autonomous control screen, and the control screen for manual operations are these components. Figure 6 (b) shows a general workflow diagram for the app.

When the app is first launched, the Home Screen appears shown in Figure 7 (a). The AD and the robot's BT connection are shown on this screen. In addition, there are buttons for the selection of manual or autonomous control screen and choice of reset and shutdown

3.1 Manual control screen

The screen where manual control of the MR is offered is known as the "Manual Control Screen". There are buttons for direction, speed change and indicators, return, fan, and lights on the manual control screen shown in Figure 7 (b). One can control the robot's movement and alter its pace, and its fan and headlamps can be turned on and off using these buttons.

It is based on sending the string data type information sent from the AD to Arduino when the relevant button is pressed. This information was read in Arduino and a command was written for the desired task. Motor speed values are sent in PWM and these values are sent to the motor driver to control the robot.

It can be used when the user wants to use the robot manually, or it can be used to bring the robot to its starting position with autonomous control.

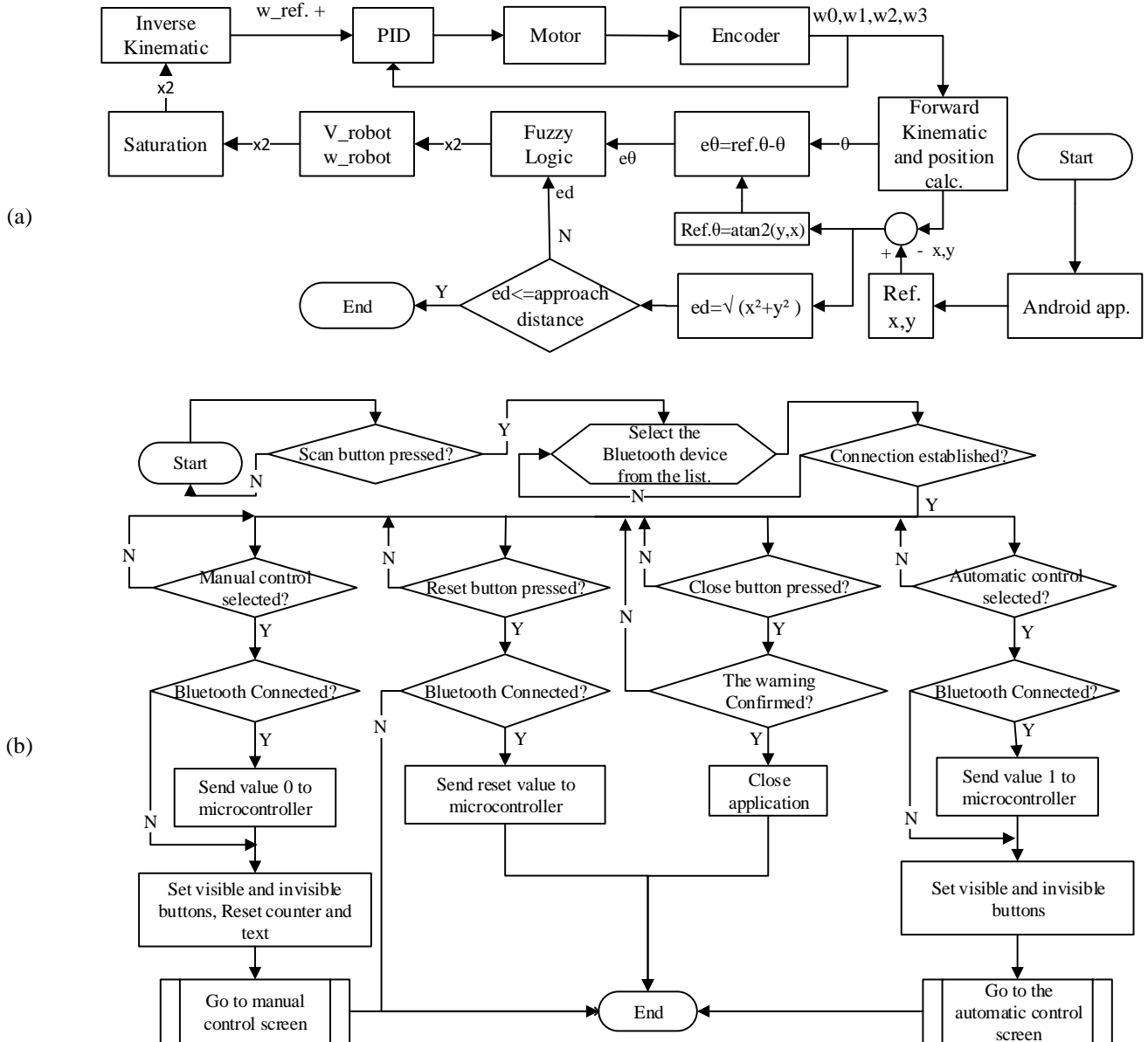


Figure 6. General workflow diagram (a) autonomously control software and (b) Android application software

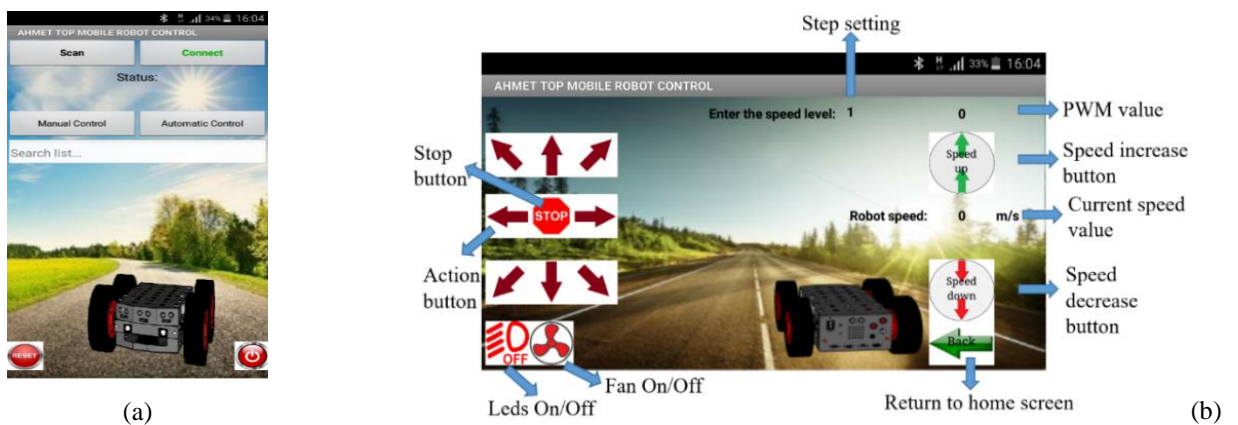


Figure 7. Android application (a) Home screen and (b) Manual control screen

3.1 Autonomous control screen

Neural Networks, Fuzzy Logic, and so forth. Algorithms can be used to control the robot's location and speed. Sending the desired position and approach distance information for the robot to the robot as a reference value is necessary once the control algorithms have been loaded into the robot processor. This procedure is likewise carried out on the Android application's autonomous control panel. Three input, deletion, and confirmation buttons for reference coordinate points and a back button are present on this screen, as shown in Figure 8 (a). Unlike manual control, no direction or speed information is given to the robot, only the desired coordinate point and lookahead are given. Control algorithms determine the speed and direction of the robot.

The user can enter the reference x and y axes and the robot's desired approach distance to the aim point in meters. In addition, he/she can enter three reference points $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3,$ and $y_3,$ as well as specify two targets by giving the zero value to the first reference point or a single target by giving zero values to the two reference point. The approach distance also defines the robot's distance from the goal in meters. If at least one of the values to be entered on the screen is missing, the missing parts are marked with red as in Figure 9 and the parts where the value is entered are green ticks. Then, an error message is displayed stating that the values must be completed and the send button must be pressed. When the send button is pressed after all the values are entered, this data is transmitted to the Arduino, which processes these values as a reference. In addition, the coordinate axis in Figure 8 (b) is displayed, and the instant position of the robot and whether it reaches the given targets can be seen from here.

For example, by entering $x_1:2, y_1:2, x_2:4, y_2:2, x_3:6, y_3:0$ m reference values and 0.05 m approach distance in Figure 10 (a), these reference values are sent to the robot when the

send button is pressed. While the robot is performing its autonomous movement, the data collected on the AD via BT and the graphic in Figure 10 (b) are drawn on the screen.

The share files button at the bottom of Figure 11 (a) turns on when the robot has finished its motion. In addition to the instant position of the robot, information such as the robot's linear speed, angular speed, angle, angle error, reference, and actual speeds of the motors are collected in Excel format, and with this share button, it can be shared on platforms such as mail, WhatsApp, drive, etc., as seen in Figure 11 (b). In addition, as in Figure 11 (c), this information is saved to the AD. xls extension and the instant graphic as .jpg extension.

When sharing via mail, the Excel file containing the data and the explanation is automatically added to the mail as seen in Figure 12. The workflow diagram of the above processes is given in Figure 13.

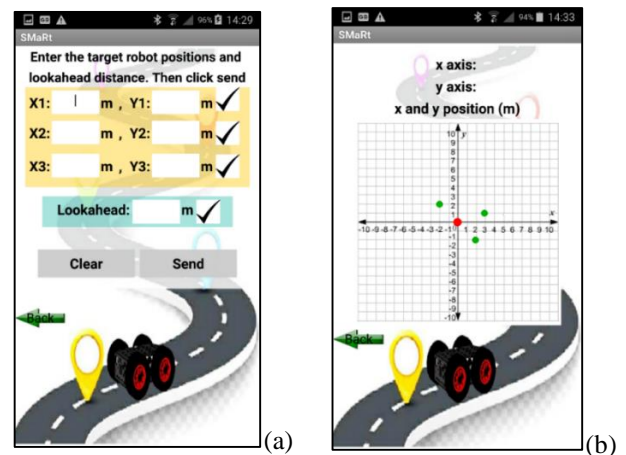


Figure 8. Application's (a) Autonomous control screen and (b) Instant location drawing screen

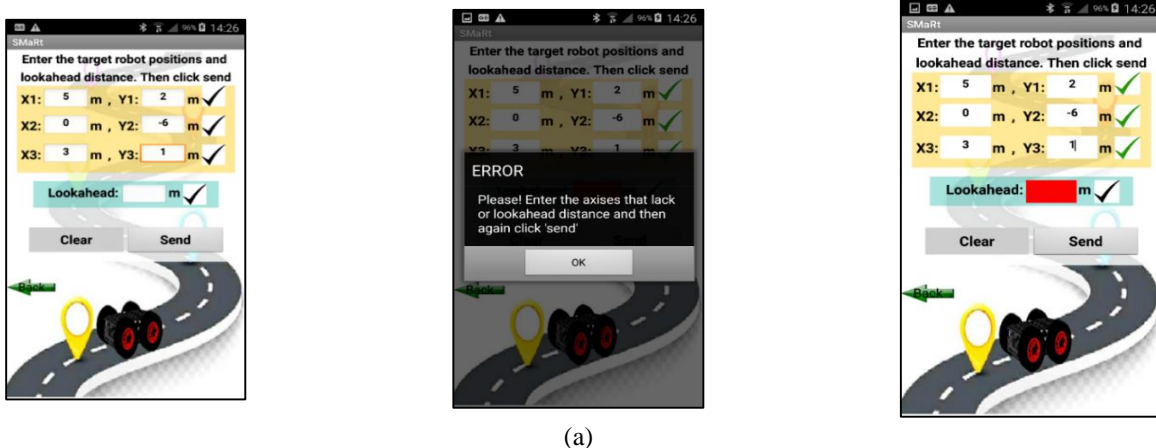


Figure 9. Error messages received in case of missing reference values (a) Only approach distance is missing, (b) Missing two coordinates and approach distance (c) All values are missing

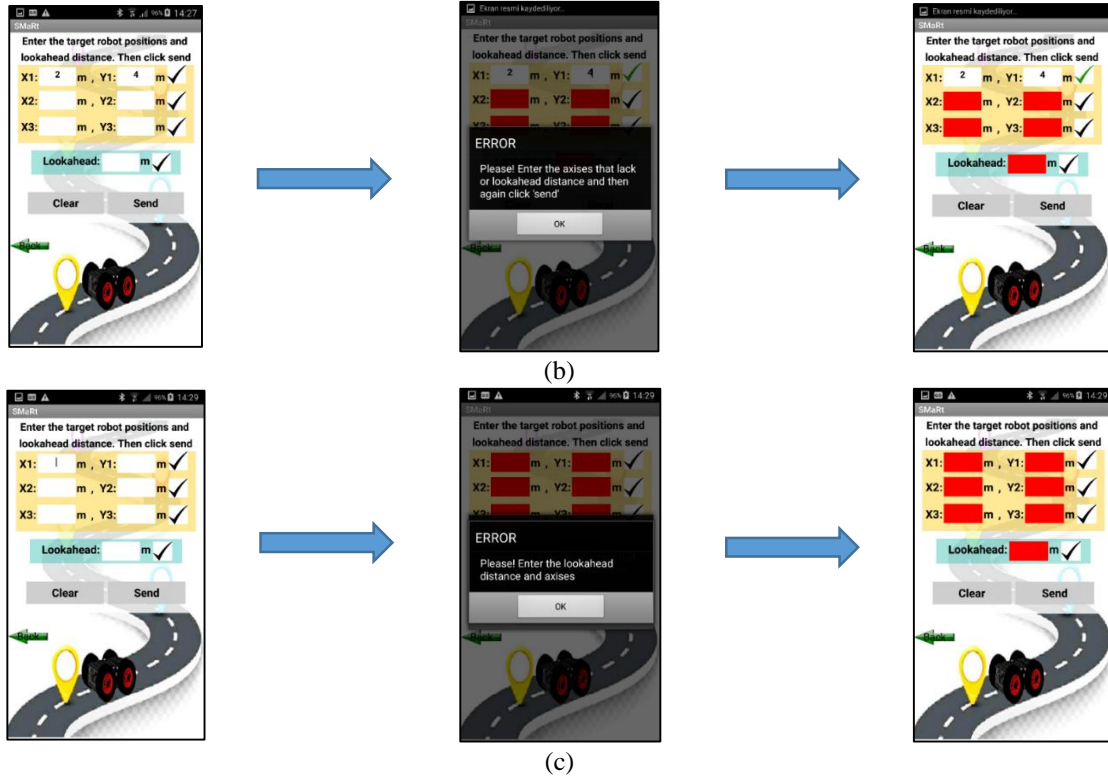


Figure 9 (continue). Error messages received in case of missing reference values (a) Only approach distance is missing, (b) Missing two coordinates and approach distance (c) All values are missing

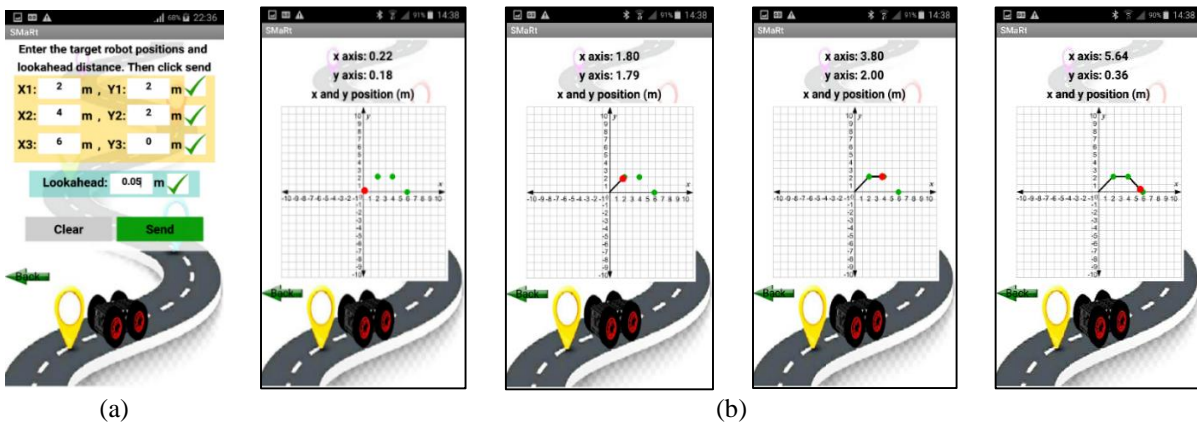


Figure 10. (a) Reference values sent to the robot and (b) Instant motion graph of the robot

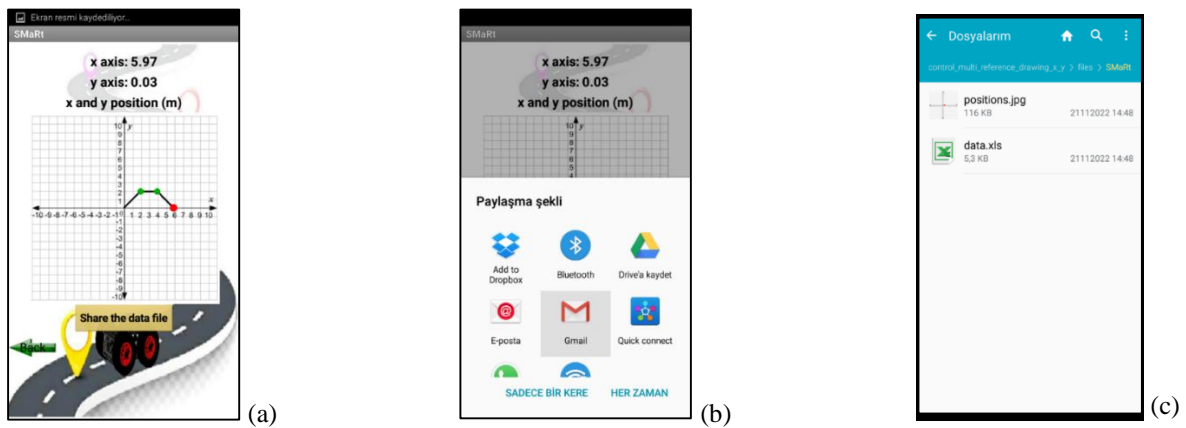


Figure 11. (a) File sharing button, (b) File sending options and (c) Saving files

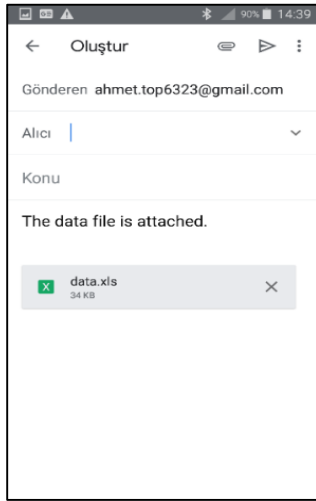


Figure 12. Sending the data file by e-mail

4 Results and discussion

The coordinate points (1,0), (1,2), (3,2) m, and the approach distance of 0.05 m were sent as references from the AD to the robot, respectively. During the autonomous movement of the robot, the data transferred to the AD were collected in Excel and transmitted to the computer by mail at the end of the movement. By transferring these collected data

to the MATLAB program, robot performances in Figure 14 and motor speed and errors in Figure 15 were obtained. Since the first target point is on the x-axis, the robot moved straight as in Figure 14 (a) without any rotational movement. It is also understood from the angle graph in Figure 14 (b) and the angular speed graph in Figure 14 (c) that there is no angular motion. Looking at the motor speeds in Figure 14 and the linear speed graphs in Figure 14 (d), the robot first started to move at 25 rpm and 0.275 m/s.

The robot changed direction twice during the whole motion, once to the right and once to the left, and during this movement, which in the experimental investigation lasted 22.61 seconds, the motors and the robot made the speed errors indicated in Table 1.

Looking at the target points, both right and left turns are expected to be 90°. However, since the given approach distance is 0.05 m when the first target is reached, it does not go exactly perpendicularly to the second target, as the turn was taken from behind the point. Therefore, the first angle to rotate was 1.54 radians, while the second angle was 1.63 radians. Likewise, it turned very close to the second target and when it completed its movement, the robot stopped at an angle of 0.093 radians. The instant location information drawn on the AD screen during the movement of the robot to these reference points is shown in Figure 16.

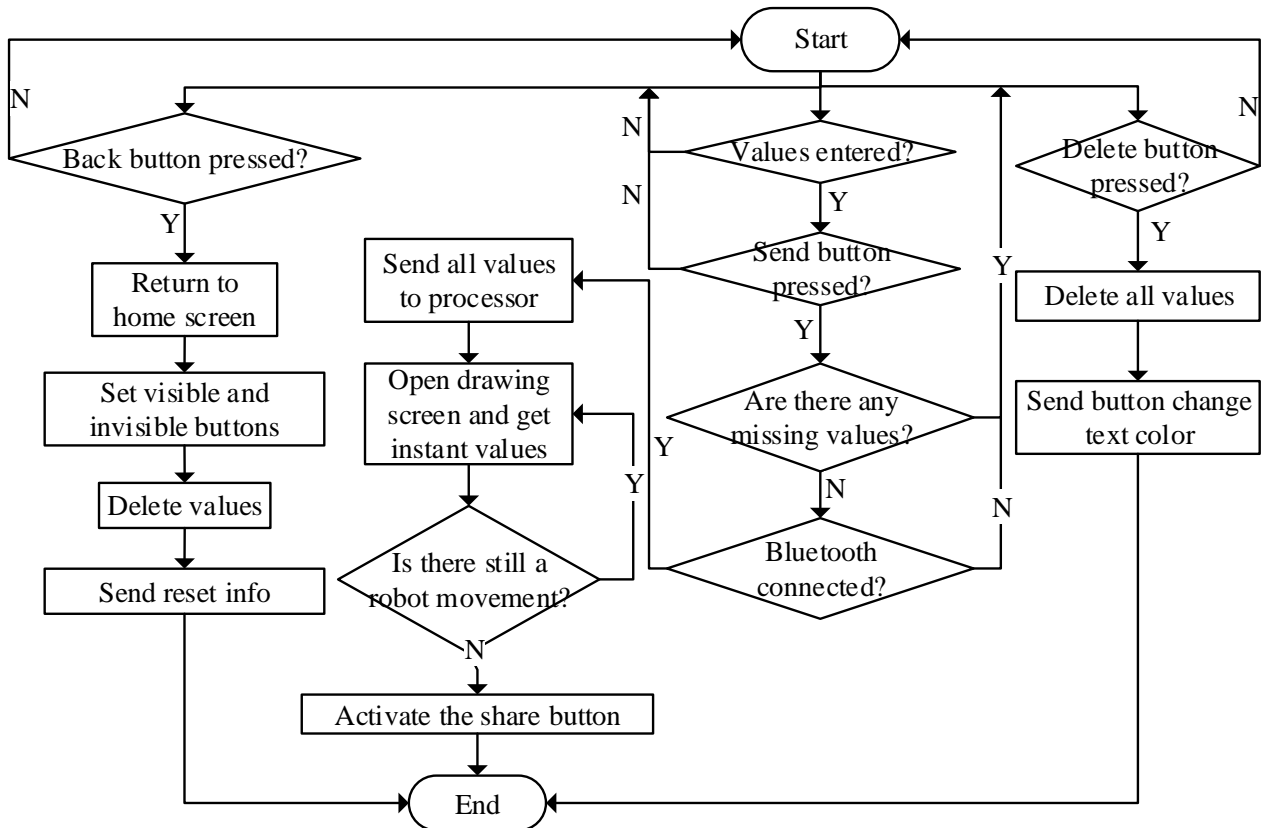


Figure 13. The autonomous control screen's workflow diagram

Table 1. Speed errors of motors and robot for $x_1:1, y_1:0, x_2:1, y_2:2, x_3:3, y_3:2$ m reference values and 0.05 m approach distance

	Motor1	Motor2	Motor3	Motor4	Robot
Mean absolute speed error (rpm)	0.311	0.262	0.269	0.305	---
Max. speed error (rpm)	12.648	12.467	12.393	12.691	---
Mean absolute angular speed error (rad/s)	---	---	---	---	0.0083
Max. angular speed error (rad/s)	---	---	---	---	0.355
Mean absolute linear speed error (m/s)	---	---	---	---	0.0025
Max. linear speed error (m/s)	---	---	---	---	0.073

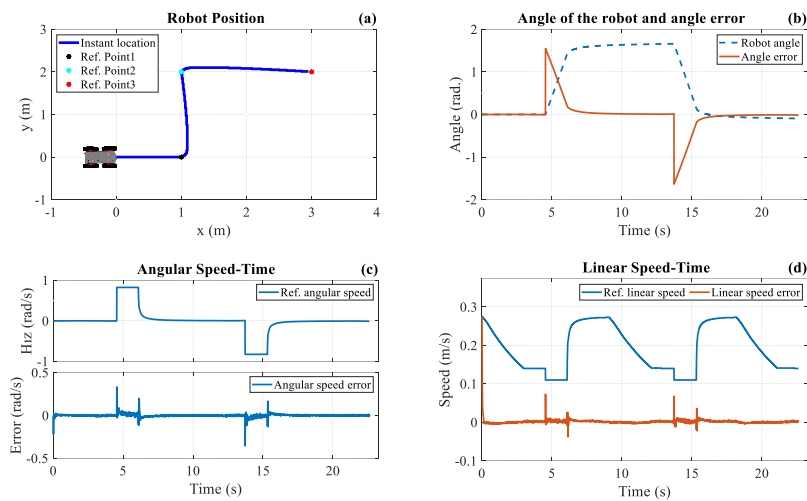


Figure 14. Experimental results for $x_1:1, y_1:0, x_2:1, y_2:2, x_3:3, y_3:2$ m reference and 0.05 m approach distance. Robot: (a) Location, (b) Angle and angle error, (c) Angular speed and error, (d) Linear speed and error

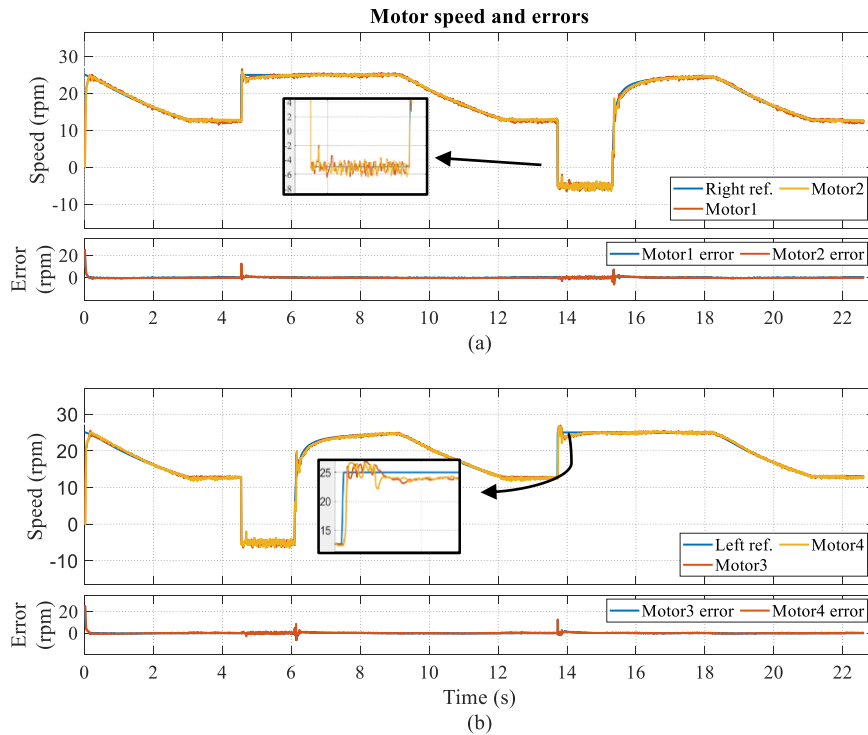


Figure 15. Experimental results for $x_1:1, y_1:0, x_2:1, y_2:2, x_3:3, y_3:2$ m reference values and 0.05 m approach distance. Robot: (a) Right motor speed and errors and (b) Left motor speed and errors

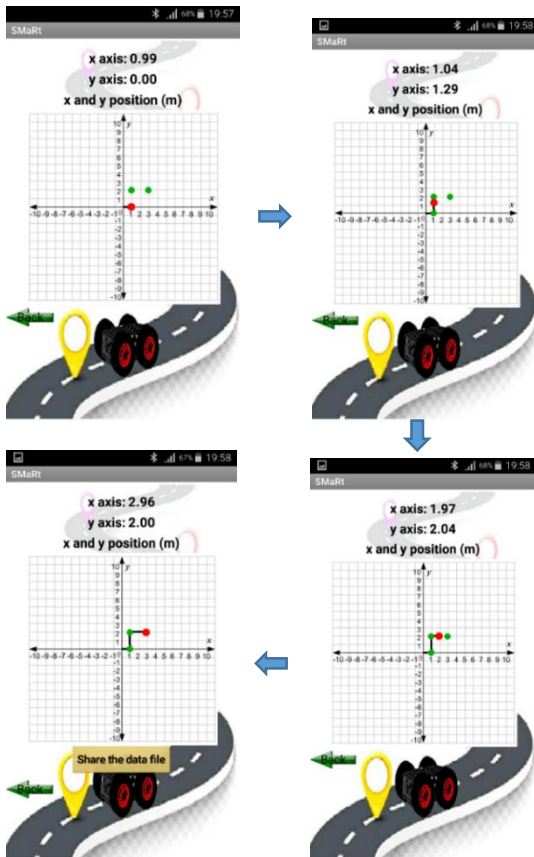


Figure 16. For the reference values $x_1:1, y_1:0, x_2:1, y_2:2, x_3:3, y_3:2$ m, an instant position graph

5 Conclusion

In this study, a new interface has been developed on the AD to send the reference and approach distance values required for autonomous control of the mobile robot that can be controlled manually with the AD. Thanks to this Android app, three different reference points where the robot is desired to go are sent to the robot processor via BT and autonomous control of mobile robots can be realized thanks to the algorithms written in the robot processor. After sending the reference values, the values such as linear speed, angular speed, angle of the robot, and the speed of the motors are collected by the processor and sent to the AD via BT when the robot starts to move. This data transferred to the AD is collected in Excel file format, as well as the instant location information of the robot is drawn on the screen. After the robot movement is completed, the Excel file where the data is collected can be shared on a desired platform. In the example carried out for this study, three different reference points are sent to the robot, and its control is ensured. The data collected during the movement were transferred to the computer by mail and the graphics were drawn in the MATLAB program. When these graphs are compared with the instantaneous position graphs drawn on the AD screen, it is seen that the robot data is transferred without error. Thanks to this app, both manual and autonomous control of robots can be realized. In manual

control, the robot can be moved to the desired position by the user at the desired speed, while in autonomous control, a PID controller and FLC are used for this work. In addition, since communication is provided via BT, With the module used, strong communication can be established up to a distance of approximately 60 meters. If a location farther than this distance is used as a reference, connection interruption may occur. Furthermore, if the speed limits of the robot are increased, the sampling time must also be increased to receive information more synchronously.

Funding

This study was supported by the Firat University Scientific Research Projects Unit with the project number TEKF.19.07.

Code availability

It can be provided if requested personally through the corresponding author's mail.

Compliance with ethical standards

Conflicts of interest

The authors declare no conflicts of interest.

Data availability

All data generated or analyzed during this study are included in this published article

Similarity rate (iThenticate): 6%

References

- [1] T. Akilan, S. Chaudhary, P. Kumari, and U. Pandey, Surveillance Robot in Hazardous Place Using IoT Technology. 2nd International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN), pp. 775-780, December 2020.
- [2] T. Mikolajczyk, H. Fuwen, L. Moldovan, A. Bustillo, M. Matuszewski, and K. Nowicki, Selection of machining parameters with Android application made using MIT App Inventor bookmarks. Procedia Manufacturing, 22, 172-179, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.027>.
- [3] S. Hong, and Y. Hwang, design and implementation for iort-based remote control robot using block-based programming. Issues in Information Systems, 21 (4), 317-330, 2020. https://doi.org/10.48009/4_iis_2020_317-330.
- [4] S. C. Pokress, and J. J. D. Veiga, MIT App Inventor: Enabling personal mobile computing, 2013. arXiv preprint arXiv:1310.2830.
- [5] A. J. Colter, Evaluating and improving the usability of MIT App Inventor. Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology, USA, 2016.
- [6] N. Fraser, Blockly: A visual programming editor. URL: <https://code.google.com/p/blockly>, 42. Accessed: 10 May 2023.

- [7] A. Begel, and E. Klopfer, Starlogo TNG: An introduction to game development. *Journal of E-Learning*, 53, 146, 2007.
- [8] M. Resnick, J. Maloney, A. Monroy-Hernández, N.Rusk, E. Eastmond, K. Brennan, and Y. Kafai, Scratch: programming for all. *Communications of the ACM*, 52(11), 60-67, 2009.
- [9] J. Maloney, M. Resnick, N. Rusk, B. Silverman, and E. Eastmond, The Scratch programming language and environment. *ACM Transactions on Computing Education (TOCE)*, 10(4), 1-15, 2010.
- [10] A.E. Amoran, A.S. Oluwole, E.O. Fagorola, and R.S. Diarah, Home automated system using Bluetooth and an android application. *Scientific African*, 11, e00711, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00711>.
- [11] A. K. K. A. Raheem, Bluetooth-Based Smart Home Automation System using Arduino UNO Microcontroller. *Al-Mansour Journal*, 27, 2017.
- [12] Y. Liu, and D. R. A. Uthra, Bluetooth-Based Smart Home Control, and Air Monitoring System. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)*, 11(5), 2020.
- [13] T.Adiono, S.F. Anindya, S. Fuada, K. Afifah, and I. G. Purwanda, Efficient Android software development using mit app inventor 2 for Bluetooth-based smart home. *Wireless Personal Communications*, 105(1), 233-256, 2019, <https://doi.org/10.1007/s11277-018-6110-x>.
- [14] K.D. Purkayastha, R.K. Mishra, A.Shil, and S.N. Pradhan, IoT-Based Design of Air Quality Monitoring System Web Server for Android Platform. *Wireless Personal Communications*, 1-20, 2021, <https://doi.org/10.1007/s11277-021-08162-3>.
- [15] R. Robianto, Analysis Of Android-Based Mobile Blocking Application Design Using MIT App Inventor. *Jurnal Ipteks Terapan*, 14(1), 1-11, 2020, <http://doi.org/10.22216/jit.2020.v14i1.5082>.
- [16] M.F. Areed, M.A. Amasha, R.A. Abougalala, S. Alkhalaf, & D. Khairy, Developing gamification quizzes based on an android app: the impact of asynchronous form. *Education and Information Technologies*, 1-22, 2021 <https://doi.org/10.1007/s10639-021-10469-4>.
- [17] M. Z. Asghar, I. Sana, K. Nasir, H. Iqbal, F.M. Kundi, & S. Ismail, Quizzes: Quiz application development using Android-based MIT APP Inventor platform. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 7 (5), 2016 <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2016.070508>.
- [18] M. Singh, G. Singh, J. Singh, & Y. Kumar, Design and Validation of Wearable Smartphone-Based Wireless Cardiac Activity Monitoring Sensor. *Wireless Personal Communications*, 1-17 2021 <https://doi.org/10.1007/s11277-021-08219-3>.
- [19] A. Verma, S.B. Amin, M. Naeem, & M. Saha, Detecting COVID-19 from chest computed tomography scans using AI-driven android application. *Computers in biology and medicine*, 143, 105298, 2022.
- [20] M. S. Ahsan, S. Das, & H. Mobarak, Android App-based Bluetooth controlled Low-cost Cloth Folding Machine. In 2020 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP), pp. 170-173, IEEE, 2020, <https://doi.org/10.1109/TENSYP50017.2020.9231012>
- [21] T. Mikolajczyk, H. Fuwen, L. Moldovan, A. Bustillo, M. Matuszewski, & K. Nowicki, Selection of machining parameters with Android application made using MIT App Inventor bookmarks. *Procedia Manufacturing*, 22, 172-179, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.027>.
- [22] R. Kleinwort, T. Semm, P.M. Falger, & M.F. Zaeh, Integration of an Android Application into the Learning Factory for Optimized Machining. *Procedia Manufacturing*, 23, 9-14, 2018.
- [23] M. Samuel, N. Nazeem, P. Sreevals, R. Ramachandran, & P. Careena, Smart indoor navigation and proximity advertising with Android application using BLE technology. *Materials Today: Proceedings*, 43, 3799-3803, 2021.
- [24] P. Rajeswari, & P. Anbalagan, Design and deployment of Android-based mobile application for performance analysis of microstrip patch antenna. *Microprocessors and Microsystems*, 77, 103111, 2020.
- [25] A. Sherafati, K. Mollazade, M. K. Saba, & F. Vesali, TomatoScan: An Android-based application for quality evaluation and ripening determination of tomato fruit. *Computers and Electronics in Agriculture*, 200, 107214, 2022.
- [26] A. H. Rajpar, A. Eladwi, I. Ali, & M.B. Ali Bashir, Reconfigurable Articulated Robot Using Android Mobile Device. *Journal of Robotics*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6695198>.
- [27] J. Nádorník, & P. Smutný, Remote control robot using Android mobile device. In *Proceedings of the 2014 15th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, pp. 373-378, 2014, <https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2014.6843630>.
- [28] A.A. Aldhalemi, A.A.Chlaihawi, and A. Al-Ghanimi, Design and Implementation of a Remotely Controlled Two-Wheel Self-Balancing Robot. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 1067, No. 1, p. 012132, 2021.
- [29] G. Haripriya, Y. Divyavani, A.R. Devi, M. Sravan, & K. Reddy, Arduino Based Voice Controlled Robot. *Complexity International*, 25(01), 2021.
- [30] G. Ersahin, & H. Sedef, Wireless mobile robot control with tablet computer. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 195, 2874-2882, 2015 <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.411>.
- [31] V. Ramya, & B. Palaniappan, Web-based embedded Robot for safety and security applications using Zigbee. *International Journal of Wireless & Mobile Networks*, 4(6), 155, 2012.
- [32] W. K. Meteab, H. T. S. ALRikabi, S. A. H. Al Sultani, & I. A. Aljazeera, Controlling and Monitoring a Robot-Car Based on Smart Phone Applications. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*



- 1094 (1), p. 012096, 2021 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1094/1/012096>.
- [33] I. Qadri, A. Muneer, & S.M. Fati, Automatic robotic scanning and inspection mechanism for mines using IoT. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1045 (1), p. 012001, 2021 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1045/1/012001>.
- [34] P. Papcun, I. Zolotova, & K. Tafsi, Control and teleoperation of robot Khepera via Android mobile device through Bluetooth and wifi. IFAC-PapersOnLine, 49 (25), 188-193, 2016 <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.12.032>.
- [35] A. Eren, H. Doğan, Design and implementation of a cost-effective vacuum cleaner robot. Turkish Journal of Engineering, 6 (2), 166-177, 2022 <https://doi.org/10.31127/tuje.830282>.
- [36] A. Kırılı, M. Dilaver, F. Çakmak, Mobile Robot Control With Android Device Sensors By Using Ros. Mugla Journal of Science and Technology, Vol 3, No 1, Pages 31-34, 2017, <https://doi.org/10.22531/muglajsci.272475>.
- [37] J. Molnár, Š. Gans and O. Slavko, Design and Implementation Self-Balancing Robot. 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine, pp. 1-4, 2020, <https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240815>.
- [38] J. Varga, L. Vargovčík, & V. Baláž, Design of Mobile Application for Controlling Robosoccer via Bluetooth. Journal of Automation and Control, 5 (2), 46-49, 2017, <https://doi.org/10.12691/automation-5-2-3>.
- [39] R. K. Fahmidur, H.M. Munaim, S.M. Tanvir, & A.S. Sayem, Internet controlled robot: A simple approach. In 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), pp. 1190-1194, 2016.
- [40] J. Azeta, C.A. Bolu, D. Hinvı, A.A.Abioye, H. Boyo, P. Anakhu, & P. Onwordi, An android-based mobile robot for monitoring and surveillance. Procedia Manufacturing, 35, 1129-1134, 2019.
- [41] E. Vasey, M.S. FakhrHosseini, Z. Zheng, C.H. Park, A. Howard, & M. Jeon, Development and usability testing of a remote control app for an interactive robot. In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, Vol. 61, No. 1, pp. 808-812, Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications, 2017.
- [42] S. Ullah, Z. Mumtaz, S. Liu, M. Abubaqr, A. Mahboob, & H.A. Madni, Single equipment with multiple applications for an automated robot-car control system. Sensors, 19(3), 662, 2019.
- [43] Massachusetts Institute of Technology, Designer and Blocks Editor, <https://Appinventor.mit.edu/explore/designer-blocks>. 10 May 2023.
- [44] E.W. Patton, M. Tissenbaum, & F. Harunani, MIT app inventor: Objectives, design, and development. In Computational thinking education, pp. 31-49, Springer, Singapore, 2019.
- [45] M.F. Pekyürek, Z. Sağlam, & A.B. Ustun, MIT App Inventor ve Android Studio kullanılarak tasarlanmış mobil uygulamanın performans karşılaştırması. Bilgi ve İletişim Teknolojileri Dergisi, 2 (2), 161-181, 2020.
- [46] P.B. De Moura Oliveira, Teaching automation and control with App Inventor applications. In 2015 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), pp. 879-884, 2015.
- [47] A. Howedi, & A. Jwaid, Design and implementation prototype of a smart house system at low cost and multi-functional. In 2016 Future Technologies Conference (FTC), pp. 876-884, 2016.
- [48] M.Z. Asghar, I. Sana, K. Nasir, H. Iqbal, F.M. Kundi, & S. Ismail, Quizzes: Quiz application development using the Android-based MIT APP Inventor platform. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 7 (5), 2016.
- [49] D. Sullivan, W. Chen, & A. Pandya, Design of remote control of home appliances via Bluetooth and Android smartphones. In 2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW), pp. 371-372, IEEE, 2017.
- [50] S. Kannapiran, & A. Chakrapani, A novel home automation system using Bluetooth and Arduino. International Journal of advances in computer and Electronics Engineering, 2 (2), 41-44, 2017.
- [51] S. S. Prayogo, T. Saptariani, & N.S. Salahuddin, Rancang Aplikasi Android Pengendali Mobil dan Kamera Menggunakan APP inventor. Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Informasi (SNATI), Vol. 1, No. 1, 2015.
- [52] T. Adiono, S.F. Anindya, S. Fuada, K. Afifah, & I.G. Purwanda, Efficient Android software development using MIT App Inventor 2 for Bluetooth-based smart home. Wireless Personal Communications, 105(1), 233-256, 2019.
- [53] M. Karakus, S. Uludag, E. Guler, S.W. Turner, & A. Ugur, Teaching computing and programming fundamentals via App Inventor for Android. International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training (ITHET) pp. 1-8. 2012.
- [54] M. Kushwah, & A. Patra, Tuning PID controller for speed control of DC motor using soft computing techniques-A review. Advance in Electronic and Electric Engineering, 4(2), 141-148, 2014.





Hibrit uydu-hava-kara ağlarında hız bölme çoklu erişim tabanlı FSO/RF iletim

Rate splitting multiple access-based FSO/RF transmission in hybrid satellite-aerial-terrestrial networks

Mehmet Can^{1,*} , İbrahim Altunbaş² 

^{1,2} İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, uydunun röle görevi gören yüksek irtifalı platform istasyonu (high altitude platform station, HAPS) yardımıyla birden çok kullanıcıyla hız bölme çoklu erişim (rate-splitting multiple access, RSMA) tekniğini kullanarak haberleşme sağladığı sistemin performansı incelenmiştir. Uydu ile HAPS arasında serbest alan optik (free space optics, FSO) bağlantısı varken HAPS ile kullanıcılar arasında radyo frekansı (radio frequency, RF) bağlantısı vardır. RF ve FSO haberleşmesi kullanan hibrit-uydu-hava kara ağları için uygun kanal modelleri dikkate alınarak ele alınan sistemde kullanıcıların kesinti olasılığı ifadeleri kapalı formda elde edilmiştir ve bilgisayar benzetimleri ile doğrulanmıştır. Kullanıcıların ve sistemin verimi, kesinti olasılıkları kullanılarak hesaplanmıştır. Farklı gölgeleme ve türbülans etkilerinin kullanıcıların kesinti performansına etkisi incelenmiştir. Ayrıca RSMA tabanlı sistem ile dik olmayan çoklu erişim (nonorthogonal multiple access, NOMA) tabanlı sistemin verimleri karşılaştırılmış ve RSMA tabanlı sistemin artan kullanıcı sayısı ile beraber daha iyi performans sergilediği gösterilmiştir. Örneğin, iletim gücü 20 dBm ve 4 kullanıcı için RSMA, sistem verimi açısından NOMA'ya göre 0.16 bpcu kazanç sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Hibrit uydu-hava-kara ağları, Hız bölme çoklu erişim, FSO/RF, Kesinti olasılığı, Sistem verimi

1 Giriş

Uydu ağları, geniş kapsama alanına sahip olması ve kara ağları ile haberleşmenin sağlanamadığı alanlarla da bağlantı kurulmasına olanak sağlaması sebebiyle gelecek nesil haberleşme sistemlerinde çok daha önemli oranda yer alacağı düşünülen teknolojilerden bir tanesidir [1]. Daha düşük üretim ve fırlatma maliyetine sahip olması ve düşük gecikme sağlaması sebebiyle düşük dünya yörüngeli (low Earth orbit, LEO) uydular hem akademik çalışmalarda hem de endüstride ilgi görmektedir [2]. Uyduların kullanıcı ile doğrudan haberleşme sağladığı sistemlerin yanı sıra yüksek irtifalı platform istasyonlarının (high altitude platform station, HAPS), düşük irtifalı platform istasyonlarının (low altitude platform station, LAPS) ve kara istasyonlarının röle olarak görev aldığı hibrit uydu ağlarının kullanılması da

Abstract

In this work, the performance of the system in which the satellite communicates with multiple users by means of a high altitude platform station (HAPS), which is served as a relay, using the rate-splitting multiple access (RSMA) technique is investigated. The link between satellite and HAPS is free space optic (FSO) while the links between HAPS and users are radio frequency (RF). Using appropriate channel models for the considered hybrid satellite-aerial-terrestrial networks with FSO/RF transmission, the outage probability expressions of the users are derived in closed form and validated by computer simulations. The throughput of the users and the system is calculated by using outage probabilities. The effect of various shadowing and turbulence effects on the user outage performance is studied. Moreover, the RSMA-based system and the non-orthogonal multiple access (NOMA)-based system are compared in terms of system throughput and it is shown that the RSMA-based system outperforms the NOMA-based system with the increasing number of users. For example, for a 20 dBm transmit power in a 4-user scenario, RSMA provides a 0.16 bpcu throughput gain over NOMA.

Keywords: Hybrid satellite-aerial-terrestrial networks, Rate-splitting multiple access (RSMA), FSO/RF, Outage probability, Throughput

öngörülmektedir [2]. Farklı atmosfer koşulları dikkate alınarak uydu ağlarının kanal modellenmesi için yapılmış çalışmalar literatürde mevcuttur ve uydu kanallarının çok yönlü sönümlenme ve gölgelemeye maruz kaldığı gösterilmiştir [3]. [4]'te çok yönlü sönümlenmenin Rayleigh, doğrudan görüş hattının (line-of-sight, LoS) Nakagami-m dağılımı ile modellendiği ve LoS teriminden dolayı gölgelemeli Rician (shadowed Rician) olarak adlandırılan kanal modeli önerilmiştir. Uydu, HAPS ve kara istasyonlarının birlikte düşünüldüğü hibrit röle ağları [5]'te incelenmiştir ve farklı iletim stratejileri önerilmiştir. [6]'da kuvvetlendir ve aktar iletim tekniğini kullanan rölelerin bulunduğu hibrit uydu-kara ağları için farklı röle sayıları ve gölgeleme etkilerinde bit hata olasılığı performansı incelenmiştir.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: canmehmet@itu.edu.tr (M. Can)

Geliş / Received: 25.09.2023 Kabul / Accepted: 10.01.2024 Yayımlanma / Published: 15.04.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1365940

Uydu ağlarında radyo frekansı (radio frequency, RF) haberleşmenin yanı sıra serbest alan optik (free space optics, FSO) haberleşmenin de kullanılması planlanmaktadır. FSO, lisans gerektirmeyen yüksek bant genişliğine sahip olması ve yüksek veri güvenliği sağlaması gibi sebeplerle uzay haberleşmesi için umut verici bir tekniktir [7]. Açık hava koşullarında iyi performans sağlasa da bulutlu, yağmurlu ve sisli havalarda kötü hava şartları FSO bağlantısının kalitesini önemli ölçüde bozabilir. FSO haberleşmede kanal, hava koşulları ve atmosferik türbülans etkisi göz önünde bulundurularak modellenmektedir. FSO haberleşme için performans analizleri çoğunlukla Log-normal, K, Gamma-Gamma ve üstel Weibull (exponentiated Weibull) sönümlemeli kanallar kullanılarak yapılmaktadır. Literatürde kötü hava ve atmosferik koşulların etkisini azaltmak amacıyla RF ve FSO haberleşmenin hibrit olarak kullanıldığı yapılar önerilmiştir. [8]'de RF ve FSO haberleşmenin birlikte kullanıldığı hibrit yapı önerilmiştir. [9]'da hava koşullarına bağlı olarak RF ya da FSO bağlantısı seçilerek iletim yapıldığı hibrit RF/FSO iletim yöntemi önerilmiştir. [10]'da hibrit uydu-hava-kara ağları için uydu ile hava aracı arasında FSO, hava aracı ile yer arasında RF bağlantısının olduğu FSO/RF haberleşme sisteminin kesinti olasılığı (outage probability) incelenmiştir.

Yüksek veri hızı, cihazların aynı anda sürekli haberleşme sağlayabilmesi ve kaynakların daha verimli kullanılması gelecek nesil haberleşme sistemlerindeki temel gereksinimlerdir. Ancak artan kullanıcı ve cihaz sayısı göz önünde bulundurulduğunda geleneksel dik çoklu erişim tekniklerinin bu gereksinimleri karşılayamayacağı düşünülmektedir. Bu yüzden dik olmayan çoklu erişim (nonorthogonal multiple access, NOMA) teknikleri literatürde büyük ilgi görmüştür. NOMA'da çok sayıda kullanıcının işareti kontrollü bir şekilde girişime izin verilerek aynı kaynaktan iletilmektedir [11]. Son yıllarda NOMA tabanlı uydu röle ağları da literatürde yer bulmuştur. [12]'de yer istasyonlarının uydu ile kullanıcılar arasında röle görevi gördüğü NOMA tabanlı hibrit uydu-kara röle ağlarında kesinti olasılığı incelenmiştir. [13]'te NOMA tabanlı hibrit uydu-hava-kara ağları için FSO/RF haberleşmede kesinti olasılığı incelenmiştir.

Hız bölme çoklu erişim (rate-splitting multiple access, RSMA) son yıllarda literatürde ilgi gören bir çoklu erişim tekniğidir. RSMA'da kullanıcıların verileri ortak ve özel bölüm olmak üzere ikiye bölünür. Tüm kullanıcıların ortak bölümleri tek bir ortak işarete eşlenir ve özel bölümlerin ayrı ayrı eşlenmesiyle oluşan özel işaretlerle birlikte vericiden gönderilir. Ortak işaret tüm kullanıcılar tarafından çözülürken özel işaretler sadece ilgili kullanıcılar tarafından çözülür. Kullanıcılarda özel işaretin çözülebilmesi için ilk olarak ardışık girişim giderme (successive interference cancellation, SIC) tekniği ile ortak işaretin çözülüp alınan işareten çıkarılması gerekmektedir. Özel işaretler çözülürken diğer kullanıcıların özel işaretlerine gürültü gibi davranılır. Bu yönüyle RSMA, daha genel ve esnek bir çoklu erişim tekniğidir [14]. Ayrıca, girişimin kısmen çözülüp kısmen gürültü gibi davranılmasıyla veri hızı ve servis kalitesi artırılırken karmaşıklığın azalmasına olanak tanınır. RSMA özellikle çok girişli çok çıkışlı (multiple-input

multiple-output, MIMO) sistemler için literatürde kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Vericideki kanal bilgisinin kusurlu olduğu durumda ortaya çıkacak kullanıcı girişimi de göz önünde bulundurularak ön kodlamanın yapıldığı RSMA şeması [15]'te incelenmiştir. [16]'da vericide çok antenin bulunduğu kullanıcı işbirlikli RSMA şeması önerilmiştir. [17]'de MIMO uydu ağlarına RSMA tekniği uygulanmıştır. Ayrıca MIMO'nun yanı sıra tek girişli tek çıkışlı (single-input single-output, SISO) sistemler için de RSMA'nın kullanıldığı çalışmalar literatürde mevcuttur. [18]'de SISO sistemlerde kullanıcıların ortak ve özel mesajları için uygun veri hızı ve iletim gücü optimizasyonu incelenmiştir. [19]'da hava aracının baz istasyonu gibi düşünüldüğü ve RSMA ile kullanıcılara hizmet sağladığı SISO sistem için kesinti olasılığı incelenmiştir.

1.1 Yapılan çalışmanın literatüre katkıları

Bu çalışmada, uydu-hava-kara ağlarında RSMA tekniğinin performansı incelenmiştir. Uydu ile HAPS arasında FSO haberleşmesi yapılırken, HAPS ile karada bulunan kullanıcılar arasında RF haberleşmesi yapılmaktadır. FSO bağlantısı Gamma-Gamma sönümlemeli kanal ile, RF bağlantısı ise gölgelemeli Rician sönümlemeli kanal ile modellenmiştir. Çalışmanın literatürdeki ilgili çalışmalarla karşılaştırılması Tablo 1'de görülmektedir ve RSMA'nın ve RF/FSO haberleşmesinin birlikte kullanıldığı uydu-hava-kara ağlarına uygulanması yönünden diğer çalışmalardan ayrılmaktadır.

Tablo 1. Bu çalışmanın literatürdeki ilgili çalışmalarla karşılaştırılması

Yazar	Yıl	Çoklu erişim	RF/FSO haberleşmesi	Uydu/hava/kara ağları
Yahia vd. [9]	2022	×	RF, FSO	Uydu-kara
Liu vd. [10]	2020	×	RF, FSO	Uydu-hava-kara
Ge vd. [12]	2022	NOMA	RF	Uydu-kara
Lei vd. [13]	2020	NOMA	RF, FSO	Hava-kara
Yin vd. [17]	2021	RSMA	RF	Uydu-kara
Singh vd. [19]	2021	RSMA	RF	Uydu-hava-kara
Ashrafzadeh vd. [20]	2019	×	RF, FSO	Kara
Bu makale	2024	RSMA	RF, FSO	Uydu-hava-kara

Bu çalışmanın temel katkıları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

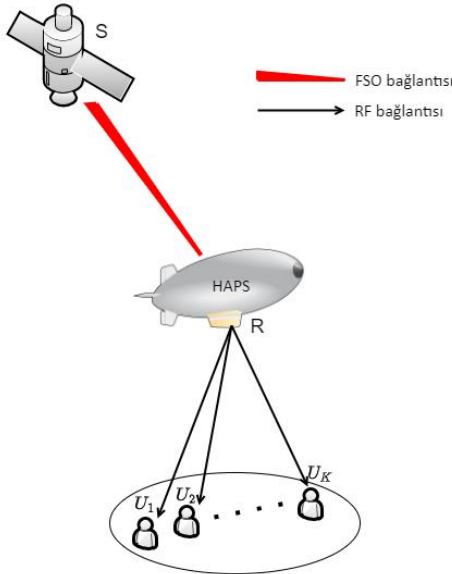
- RSMA tabanlı hibrit uydu-hava-kara ağlarının kesinti olasılığı ifadeleri, ele alınan kanallarda RF ve FSO haberleşme için kapalı formda elde edilmiştir.
- Elde edilen kesinti olasılığı ifadelerinden yararlanılarak kullanıcıların ve sistemin verimi (throughput) hesaplanmıştır.
- Sistemin kesinti olasılığı, RF bağlantısı için farklı gölgeleme etkileri ve FSO bağlantısı için farklı

türbülans etkileri altında incelenmiştir ve bilgisayar benzetimleri ile teorik sonuçların uyumlu olduğu doğrulanmıştır.

- Ele alınan RSMA tabanlı sistem, NOMA tabanlı sistem ile sistem verimi açısından karşılaştırılmıştır ve kullanıcı sayısının artmasıyla RSMA tabanlı sistemin daha iyi performans sağladığı gösterilmiştir.

2 Sistem modeli

Uydunun (S) röle görevi gören HAPS (R) yardımıyla K kullanıcıyla ($U_k, k = 1, \dots, K$) haberleşme sağladığı RSMA tabanlı sistem modeli Şekil 1'de görülmektedir. S ile R arasında FSO, R ile kullanıcılar arasında ise RF haberleşme yapılmaktadır. Vericilerde ve alıcılarda tek anten bulunmaktadır ve tüm alıcıların kusursuz kanal bilgisine sahip olduğu varsayılmaktadır. İletim iki zaman aralığında gerçekleşmektedir.



Şekil 1. Sistem modeli.

İlk zaman aralığında RSMA tekniği kullanılarak U_k 'nın mesajı, ortak mesaj ($W_{c,k}$) ve özel mesaj ($W_{p,k}$) olmak üzere iki bölüme ayrılır ($k = 1, \dots, K$). Kullanıcıların ortak mesajları birleştirilerek S'den iletilecek ortak mesaj W_c oluşturulur. W_c ve $W_{p,k}$ sırasıyla birim güçlü s_c ve $s_{p,k}$ işaretlerine eşlenir. Bu işaretlerin süperpozisyonu ile birim güçlü $x = \sqrt{\alpha_c} s_c + \sum_{k=1}^K \sqrt{\alpha_k} s_{p,k}$ işareti elde edilir. Burada α_c ve α_k sırasıyla ortak ve özel mesajlar için atanan güç katsayılarını göstermektedir ve $\alpha_c + \sum_{k=1}^K \alpha_k = 1$ olmalıdır. S'de optik işaret oluşturmak için alt taşıyıcı yoğunluk modülasyonu (subcarrier intensity modulation, SIM) kullanılır ve optik işaretin pozitif değerinde olması için DC bileşen eklenir [20]. R'de yoğunluk modülasyonu/doğrudan algılama (intensity modulation/direct detection, IM/DD) yöntemi kullanılır [20] ve R'de alınan optik işaret

$$y_r = \eta \ell_R I \sqrt{P_S} (1 + x) + n_R \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir [20]. Burada P_S , S'deki iletim gücünü göstermektedir ve n_R , sıfır ortalamalı ve σ_R^2 varyanslı toplamsal Gauss gürültüsüdür. η elektrik-optik dönüşüm katsayısını göstermektedir. $l_R = \frac{1}{2}(G_t + G_r - Att_{FS} - Att_{Atm} + L_{lens} - M)$ [dB] olarak tanımlıdır [10] ve G_t , G_r , Att_{FS} , Att_{Atm} , L_{lens} ve M sırasıyla verici kazancı, alıcı kazancı, yol kaybı, atmosferik zayıflama, lens kaybı ve sistem marjini göstermektedir. $I = h_a h_p$ olmak üzere S ile R arasındaki FSO kanal katsayısını göstermektedir. Burada h_a , Gamma-Gamma dağılımlı atmosferik türbülans sönümlenme katsayısını, h_p ise hedefleme hatasını (pointing error) göstermektedir. R'de DC bileşen filtreledikten sonra alınan işaret aşağıdaki gibi ifade edilebilir [20]:

$$y_r' = \eta \ell_R I \sqrt{P_S} x + n_R. \quad (2)$$

R'de ortak işaret, özel işaretlere gürültü gibi davranılarak çözülür. R'de s_c 'ye ilişkin işaret girişim gürültü oranı (signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR) ifadesi aşağıdaki gibi hesaplanır [19]:

$$\gamma_R^c = \frac{\eta^2 \ell_R^2 I^2 P_S \alpha_c}{\eta^2 \ell_R^2 I^2 P_S (1 - \alpha_c) + \sigma_R^2}. \quad (3)$$

s_c alınan işareten çıkarılır ve sonrasında özel işaret, diğer kullanıcıların özel işaretlerine gürültü gibi davranılarak çözülür. Bu durumda R'de $s_{p,k}$ 'ye ilişkin SINR ifadesi aşağıdaki gibidir [19]:

$$\gamma_R^{p,k} = \frac{\eta^2 \ell_R^2 I^2 P_S \alpha_k}{\eta^2 \ell_R^2 I^2 P_S (1 - \alpha_c - \alpha_k) + \sigma_R^2}. \quad (4)$$

İkinci zaman aralığında R, çöz ve aktar yöntemini kullanarak çözdüğü işaretlerin süperpozisyonunu (x') kullanıcılara iletir. U_k 'da alınan işaret

$$y_k = \ell_k h_{R,k} \sqrt{P_R} x' + n_k, \quad k = 1, \dots, K \quad (5)$$

şeklinde. Burada P_R , R'deki iletim gücünü göstermektedir ve n_k , sıfır ortalamalı σ_k^2 varyanslı toplamsal kompleks Gauss gürültüsüdür. $l_k = \frac{1}{2}(20 \log_{10}(d_k) + 20 \log_{10}(f) + 92.4)$ [dB] biçiminde hesaplanmaktadır [10] ve d_k , R ile U_k arasındaki km cinsinden uzaklığı, f ise GHz cinsinden frekansı ifade etmektedir. $h_{R,k}$, R ile U_k arasındaki kompleks kanal katsayısını göstermektedir ve kanal gölgelemeli Rician sönümlenmeli olarak modellenmiştir.

Tüm kullanıcılarda ortak işaret SIC tekniği ile çözülür ve alınan işareten çıkarılır. Kullanıcılarda s_c 'ye ilişkin SINR ifadesi aşağıdaki gibidir [19]:

$$\gamma_{U_k}^c = \frac{\ell_k^2 |h_{R,k}|^2 P_R \alpha_c}{\ell_k^2 |h_{R,k}|^2 P_R (1 - \alpha_c) + \sigma_k^2}. \quad (6)$$

SIC'den sonra kullanıcılarda $s_{p,k}$ 'ye ilişkin SINR ifadesi aşağıdaki gibi ifade edilir [19]:

$$\gamma_{U_k}^{p,k} = \frac{\ell_k^2 |h_{R,k}|^2 P_R \alpha_k}{\ell_k^2 |h_{R,k}|^2 P_R (1 - \alpha_c - \alpha_k) + \sigma_k^2}. \quad (7)$$

3 Kesinti olasılığı ve sistem verimi

3.1 Kesinti olasılığı

Haberleşmenin kesintiye uğramaması için rölede ve kullanıcılarda ortak ve özel işaretlerin çözülmesi sırasında [Denklem \(3\)](#), [\(4\)](#), [\(6\)](#) ve [\(7\)](#) ile hesaplanan SINR değerlerinin istenen eşik değerler $\gamma_{th,c}$ ve $\gamma_{th,p,k}$ 'den yüksek olması gerekmektedir. Bu SINR değerlerinin herhangi biri istenen eşik değerinin altına düşerse kesinti olacaktır. Burada $\gamma_{th,c} = 2^{2R_c} - 1$ ve $\gamma_{th,p,k} = 2^{2R_{p,k}} - 1$ olarak tanımlıdır. R_c ve $R_{p,k}$ sırasıyla ortak işaret ve U_k 'nin özel işareti için hedeflenen veri hızlarıdır. Ayrıca $R_{c,k}$, U_k 'nin ortak mesajı için hedeflenen veri hızını göstermek üzere $R_c = \sum_{k=1}^K R_{c,k}$ olarak tanımlıdır. U_k için hedeflenen toplam hız $R_k = R_{c,k} + R_{p,k}$ şeklinde hesaplanabilir.

U_k için kesinti olasılığı aşağıdaki gibi ifade edilebilir [\[19\]](#):

$$\begin{aligned} P_{o,k} &= 1 - \Pr(\gamma_R^c \geq \gamma_{th,c} \cap \gamma_R^{p,k} \geq \gamma_{th,p,k} \cap \gamma_{U_k}^c \geq \gamma_{th,c} \cap \gamma_{U_k}^{p,k} \\ &\geq \gamma_{th,p,k}) \\ &= 1 - \Pr(I^2 \geq C_1 \cap I^2 \geq P_1 \cap |h_{R,k}|^2 \geq C_2 \cap \\ &|h_{R,k}|^2 \geq P_2). \end{aligned} \quad (8)$$

Burada $C_1 = \frac{\sigma_R^2 \gamma_{th,c}}{\eta^2 \ell_R^2 P_S [\alpha_c - (1 - \alpha_c) \gamma_{th,c}]}$, $P_1 = \frac{\sigma_R^2 \gamma_{th,p,k}}{\eta^2 \ell_R^2 P_S [\alpha_c - (1 - \alpha_c) \gamma_{th,p,k}]}$, $C_2 = \frac{\sigma_k^2 \gamma_{th,c}}{\ell_k^2 P_R [\alpha_c - (1 - \alpha_c) \gamma_{th,c}]}$ ve $P_2 = \frac{\sigma_k^2 \gamma_{th,p,k}}{\ell_k^2 P_R [\alpha_c - (1 - \alpha_c) \gamma_{th,p,k}]}$ olarak tanımlıdır. C_1 ve C_2 'den görüldüğü üzere $\alpha_c > \frac{\gamma_{th,c}}{1 + \gamma_{th,c}}$ koşulu sağlanmalıdır.

Benzer şekilde P_1 ve P_2 'den görüldüğü üzere $\alpha_k > \frac{(1 - \alpha_c) \gamma_{th,c}}{1 + \gamma_{th,c}}$ koşulu sağlanmalıdır. Aksi durumda kesinti olacaktır ve bu durumda $P_{o,k} = 1$ olur.

I^2 ve $|h_{R,k}|^2$ bağımsız oldukları için [Denklem \(8\)](#) aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir:

$$P_{o,k} = 1 - \Pr(I^2 \geq \Lambda_1) \Pr(|h_{r,k}|^2 \geq \Lambda_2). \quad (9)$$

Burada, $\Lambda_1 = \max(C_1, P_1)$ ve $\Lambda_2 = \max(C_2, P_2)$ olarak tanımlıdır.

I^2 ve $|h_{R,k}|^2$ için birikimli dağılım fonksiyonları (cumulative distribution function, CDF) kullanılarak [Denklem \(9\)](#) aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} P_{o,k} &= 1 - (1 - F_{I^2}(\Lambda_1)) \left(1 - F_{|h_{R,k}|^2}(\Lambda_2)\right) \\ &= F_{I^2}(\Lambda_1) + F_{|h_{R,k}|^2}(\Lambda_2) - F_{I^2}(\Lambda_1) F_{|h_{R,k}|^2}(\Lambda_2). \end{aligned} \quad (10)$$

I^2 için CDF aşağıdaki gibi verilmiştir [\[21\]](#):

$$F_{I^2}(x) = \frac{\xi^2}{\Gamma(\mu)\Gamma(\zeta)} G_{2,4}^{3,1} \left(\frac{\mu\zeta}{A_0} \sqrt{x} \middle| 1, \xi^2 + 1 \right)_{\xi^2, \mu, \zeta, 0}. \quad (11)$$

Burada $G_{p,q}^{m,n}(\cdot)$, Meijer-G fonksiyonunu [\[22, Denklem \(9.301\)\]](#) ve $\Gamma(\cdot)$, Gamma fonksiyonunu göstermektedir. A_0 , hedefleme hatası olmadığı durumdaki geometrik kayıptır. $\xi = \frac{\omega_e}{2\sigma_s}$ olarak tanımlıdır ve ω_e eşdeğer ışın yarıçapını (equivalent beam radius) gösterirken σ_s ise alıcıdaki hedefleme hatasının yer değiştirme standart sapmasıdır. μ ve ζ atmosferik türbülans parametreleridir.

$|h_{R,k}|^2$ için CDF aşağıdaki gibi verilmiştir [\[4\]](#):

$$F_{|h_{R,k}|^2}(x) = \nu \sum_{l=0}^{\infty} \frac{(m)_l (\delta)_l}{(1)_l l!} \beta^{-l-1} \gamma(l+1, \beta x). \quad (12)$$

Burada $\nu = \frac{1}{2b_0} \left(\frac{2b_0 m}{2b_0 m + \Omega} \right)^m$, $\beta = \frac{1}{2b_0}$ ve $\delta = \frac{\Omega}{2b_0(2b_0 m + \Omega)}$ olarak tanımlıdır. $2b_0$ ve Ω sırasıyla çok yollu sönümleme ve LoS için ortalama gücü gösterirken m sönümleme parametresidir. $(\cdot)_l$ ve $\gamma(\cdot, \cdot)$ sırasıyla Pochhammer sembolünü [\[22, s. xliii\]](#) ve tamamlanmamış alt Gamma (lower incomplete Gamma) fonksiyonunu [\[22, Denklem \(8.354.1\)\]](#) göstermektedir.

[Denklem \(11\)](#) ve [\(12\)](#), [\(10\)](#)'da yerine koyularak U_k için kesinti olasılığı hesaplanabilir.

3.2 Sistem verimi

Kullanıcılardaki verim, [Denklem \(10\)](#) yardımıyla kanal kullanımı başına bit sayısı (bit per channel use, bpcu) cinsinden aşağıdaki gibi hesaplanır [\[19\]](#):

$$\tau_k = (1 - P_{o,k}) \frac{R_k}{2}. \quad (13)$$

[Denklem \(13\)](#) kullanılarak sistemin verimi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\tau_{sistem} = \sum_{k=1}^K \tau_k. \quad (14)$$

4 Benzetim sonuçları

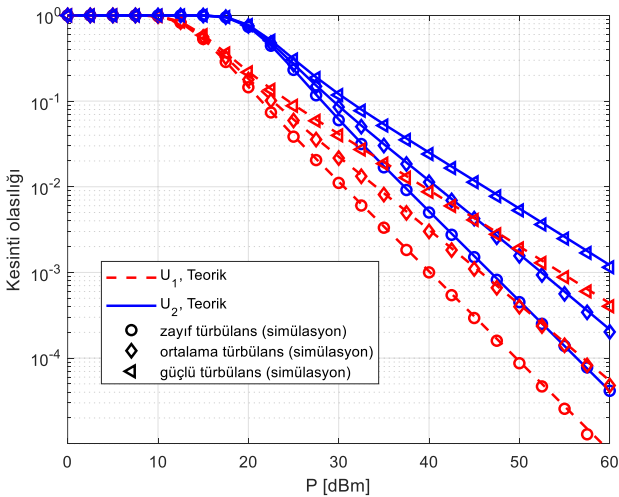
Bu bölümde, ele alınan sistemin kesinti olasılığı ve sistem verimi için analitik sonuçlar ve bilgisayar benzetimleri farklı parametrelerde incelenmiştir. Sistemin kesinti olasılığı bilgisayar benzetimleri [Denklem \(8\)](#), analitik sonuçlar ise [Denklem \(10\)](#) kullanılarak çizdirilmiştir. Sistem verimi sonuçları için [Denklem \(14\)](#) kullanılmıştır. Ayrıca ele alınan RSMA tabanlı sistem, NOMA tabanlı sistem ile karşılaştırılmıştır. NOMA tabanlı sistemde kullanıcıların mesajları doğrudan işaretlere eşlenir ve bu işaretlerin süperpozisyonu S'den iletilir. Kullanıcılarda ise kendisinden daha yüksek güç atanan kullanıcıların işaretlerinden

kaynaklanan girişim, en yüksek güç atanan kullanıcının işaretinden başlanarak SIC ile tamamen giderilmektedir. Bu işlemden sonra kullanıcının işareti çözülmektedir. FSO bağlantısı için zayıf, orta ve güçlü türbülans için μ ve ζ parametreleri sırasıyla ($\mu = 2.902, \zeta = 2.51$), ($\mu = 2.296, \zeta = 1.822$) ve ($\mu = 2.064, \zeta = 1.342$) olmaktadır [10]. $\eta = 1$ ve $\xi = 3$ alınmıştır. RF bağlantısı için zayıf, ortalama ve güçlü gölgeleme için b_k, m_k ve Ω_k parametreleri sırasıyla ($b_0 = 0.158, m = 19.4, \Omega = 1.29$), ($b_0 = 0.126, m = 10.1, \Omega = 0.835$) ve ($b_0 = 0.063, m = 0.739, \Omega = 8.97 \times 10^{-4}$) olmaktadır [4]. $P_R = P_S = P$, $l_1 = l_2 = \dots = l_K = l_D$ ve $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_K^2 = \sigma_D^2$ olarak ayarlanmıştır. Ayrıca $l_R^2 = -50.74$ dB, $l_D^2 = -114.44$ dB, $\sigma_R^2 = -99.06$ dB ve $\sigma_D^2 = -136.84$ dB alınmıştır [10].

Şekil 2’de RF bağlantısı ortalama gölgeleme etkisi altındayken FSO bağlantısı için zayıf, orta ve güçlü türbülans etkileri incelenmiştir. $K = 2$ olmak üzere bilgisayar benzetim parametreleri Tablo 2’de verilmiştir. Şekil 2’den görüldüğü üzere türbülans etkisi kuvvetlendikçe kesinti olasılığı artmaktadır. Örneğin kesinti olasılığının 10^{-3} olması için güçlü türbülans olduğu durumda zayıf türbülansa göre yaklaşık 10 dB daha fazla güç harcanmaktadır. Ayrıca farklı türbülans etkileri için bilgisayar benzetimleri ile teorik sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir.

Tablo 2. Bilgisayar benzetimi parametreleri

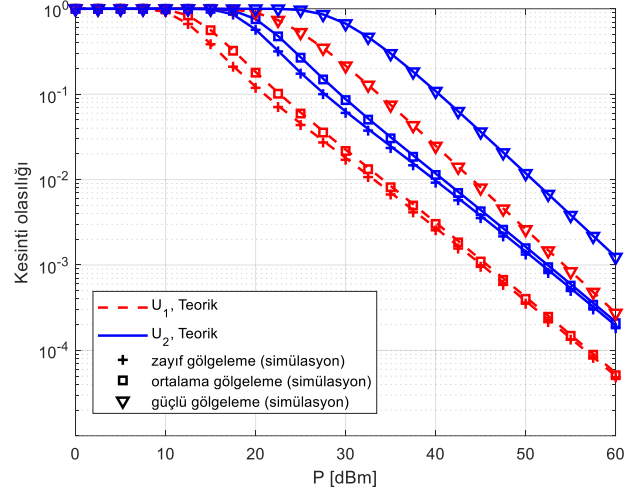
Parametre	Değer
Ortak mesaj için hedef veri hızı	$R_c = 0.5$ bpcu ($R_{c,1} = 0.1, R_{c,2} = 0.4$)
U_1 ve U_2 için hedef veri hızları	$R_1 = 0.2$ bpcu $R_2 = 1$ bpcu
Ortak ve özel mesaj için atanan güç katsayıları	$\alpha_c = 0.6$ $\alpha_1 = 0.15, \alpha_2 = 0.25$



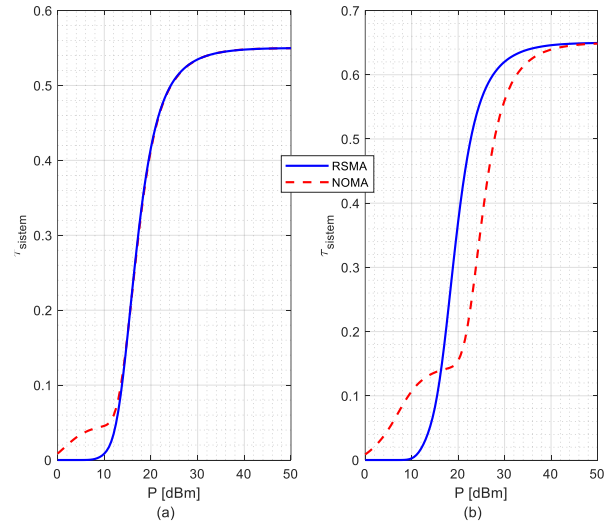
Şekil 2. Farklı türbülans etkileri için kesinti olasılığı

Şekil 3’te FSO bağlantısı orta türbülans etkisi altındayken RF bağlantısı için zayıf, ortalama ve güçlü gölgeleme etkileri incelenmiştir. $K = 2$ olmak üzere

bilgisayar benzetim parametreleri Şekil 2 ile aynıdır ve Tablo 2’de verilmiştir. Beklenildiği üzere gölgeleme etkisi arttıkça kesinti olasılığı artmaktadır. Örneğin kesinti olasılığının 10^{-3} olması için güçlü gölgeleme olduğu durumda zayıf gölgelemeye göre yaklaşık 9 dB daha fazla güç harcanmaktadır. Şekil 3’ten farklı gölgeleme parametreleri için de bilgisayar benzetimleri ile teorik sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 3. Farklı gölgeleme etkileri için kesinti olasılığı



Şekil 4. RSMA tabanlı sistem ile NOMA tabanlı sistemin karşılaştırılması: a) $K=2$ b) $K=4$.

Şekil 4’te RSMA tabanlı ve NOMA tabanlı sistem verimleri $K = 2$ ve $K = 4$ için orta türbülans ve ortalama gölgeleme altında karşılaştırılmıştır. $K = 2$ olduğu durumda RSMA için $R_c = 0.3$ ($R_{c,1} = 0.05, R_{c,2} = 0.25$), $R_{p,1} = 0.05$ ve $R_{p,2} = 0.75$ bpcu seçilmiştir. Bu durumda $R_1 = 0.1$ ve $R_2 = 1$ bpcu olmaktadır. Güç katsayıları $\alpha_c = 0.6$, $\alpha_1 = 0.05$ ve $\alpha_2 = 0.35$ olarak ayarlanmıştır. NOMA için aynı veri hızlarında güç katsayıları $\alpha_1 = 0.6$ ve $\alpha_2 = 0.4$ olarak ayarlanmıştır. $K = 4$ olduğu durumda RSMA için $R_c = 0.5$ ($R_{c,1} = R_{c,2} = R_{c,3} = 0.05, R_{c,4} = 0.35$), $R_{p,1} = R_{p,2} =$

$R_{p,3} = 0.05$ ve $R_{p,4} = 0.65$ bpcu seçilmiştir. Bu durumda $R_1 = R_2 = R_3 = 0.1$ ve $R_4 = 1$ bpcu olmaktadır. Güç katsayıları $\alpha_c = 0.6$, $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0.04$ ve $\alpha_4 = 0.28$ olarak ayarlanmıştır. NOMA için aynı veri hızlarında güç katsayıları $\alpha_1 = 0.6$, $\alpha_2 = 0.22$, $\alpha_3 = 0.12$ ve $\alpha_4 = 0.06$ olarak ayarlanmıştır. Şekil 4'ten görüldüğü üzere $K = 2$ için toplam verim RSMA ve NOMA için oldukça yakındır. $K = 4$ olduğu durumda ise düşük iletim gücünde NOMA daha iyi olsa da daha yüksek iletim güçlerinde RSMA'nın üstünlüğü görülmektedir. Örneğin $P = 20$ dBm için RSMA ile NOMA'ya göre 0.16 bpcu kazanç sağlanmaktadır.

5 Sonuçlar

Bu çalışmada, uydu-hava-kara ağlarında RSMA tabanlı FSO/RF iletim yapılan sistemin performansı incelenmiştir. Uydu ile HAPS arasında kanalın Gamma-Gamma dağılımı ile modellendiği FSO haberleşme, HAPS ile kullanıcılar arasında ise kanalın gölgelemeli Rician dağılımı ile modellendiği RF haberleşme kullanılmaktadır. Kullanıcıların kesinti olasılığı analitik yöntemlerle hesaplanmıştır. Kesinti olasılığı hesaplamaları kullanılarak kullanıcıların ve sistemin verim hesaplamaları yapılmıştır. Teorik sonuçlar bilgisayar benzetimi sonuçları ile doğrulanmıştır. Farklı türbülans etkileri ve gölgeleme etkileri altında kullanıcıların kesinti olasılığı incelenmiştir. Örneğin kesinti olasılığının 10^{-3} olması için güçlü türbülans olduğu durumda zayıf türbülansa göre 10 dB, güçlü gölgeleme olduğu durumda da zayıf gölgelemeye göre 9 dB daha fazla güç harcanması gerektiği görülmüştür. Son olarak RSMA tabanlı sistemin NOMA tabanlı sisteme göre yüksek kullanıcı sayısında daha iyi verim sağladığı gösterilmiştir. Örneğin $P = 20$ dBm için RSMA tabanlı sistem ile NOMA tabanlı sisteme göre 0.16 bpcu kazanç sağlandığı görülmüştür.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %13

Kaynaklar

- [1] O. Kodheli et al., Satellite communications in the new space era: A survey and future challenges, IEEE Commun. Surv. Tutorials, 23 (1), 70-109, 2021. doi: [10.1109/COMST.2020.3028247](https://doi.org/10.1109/COMST.2020.3028247).
- [2] Darwish T., Kurt G. K., Yanikomeroglu H., Bellemare M. and Lamontagne G., LEO satellites in 5G and beyond networks: A review from a standardization perspective, IEEE Access, 10, 35040-35060, 2022. doi: [10.1109/ACCESS.2022.3162243](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3162243).
- [3] Al-Hourani A., Guvenc I., On modeling satellite-to-ground path-loss in urban environments, IEEE Commun. Lett., 25 (3), 696-700, 2021, doi: [10.1109/LCOMM.2020.3037351](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.3037351).
- [4] Abdi A., Lau W. C., Alouini M.-S., Kaveh M., A new simple model for land mobile satellite channels: first- and second-order statistics, IEEE Trans. Wireless Commun., 2 (3), 519-528, 2003. doi: [10.1109/TWC.2003.811182](https://doi.org/10.1109/TWC.2003.811182).
- [5] Ye J., Dang S., Shihada B., Alouini M.-S., Space-air-ground integrated networks: outage performance analysis, IEEE Trans. Wireless Commun., 19 (12), 7897-7912, 2020. doi: [10.1109/TWC.2020.3017170](https://doi.org/10.1109/TWC.2020.3017170).
- [6] Yang L., Hasna M. O., Performance analysis of amplify-and-forward hybrid satellite-terrestrial networks with cochannel interference, IEEE Trans. Commun., 63 (12), 5052-5061, 2015. doi: [10.1109/TCOMM.2015.2495278](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2015.2495278).
- [7] Chaudhry A. U., Yanikomeroglu H., Free space optics for next-generation satellite networks, IEEE Consum. Electron. Mag., 10 (16), 21-31, 2021. doi: [10.1109/MCE.2020.3029772](https://doi.org/10.1109/MCE.2020.3029772).
- [8] Nadeem F., Kvicera V., Awan M.S., Leitgeb E., Muhammad S.S., Kandus G., Weather effects on hybrid FSO/RF communication link, IEEE J. Sel. Areas Commun., 27 (9), 1687-1697, 2009. doi: [10.1109/JSA-C.2009.091218](https://doi.org/10.1109/JSA-C.2009.091218).
- [9] Yahia O. B., Erdogan E., Kurt G. K., Altunbas I., Yanikomeroglu H., A weather-dependent hybrid RF/FSO satellite communication for improved power efficiency, IEEE Wireless Commun. Lett., 11 (3), 573-577, 2022. doi: [10.1109/LWC.2021.3136444](https://doi.org/10.1109/LWC.2021.3136444).
- [10] Liu X., Lin M., Zhu W.-P., Wang J.-Y., Upadhyay P. K., Outage performance for mixed FSO-RF transmission in satellite-aerial-terrestrial networks, IEEE Photonics Technol. Lett., 32 (21), 1349-1352, 2020. doi: [10.1109/LPT.2020.3025452](https://doi.org/10.1109/LPT.2020.3025452).
- [11] Dai L., Wang B., Yuan Y., Han S., Chih-lin I., Wang Z., Non-orthogonal multiple access for 5G: Solutions, challenges, opportunities, and future research trends, IEEE Commun. Mag., 53 (9), 74-81, 2015. doi: [10.1109/MCOM.2015.7263349](https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7263349).
- [12] Ge R., Bian D., An K., Cheng J., Zhu H., Performance analysis of cooperative nonorthogonal multiple access scheme in two-layer GEO/LEO satellite network, IEEE Syst. J., 16 (2), 2300-2310, 2022. doi: [10.1109/JSYST.2021.3091781](https://doi.org/10.1109/JSYST.2021.3091781).
- [13] Lei X., Yang L., Zhang J., Li G., Chen J., LAP-based FSO-RF cooperative NOMA systems, 2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference (VTC2020-Fall), 1-5, 2020. doi: [10.1109/VTC2020-Fall49728.2020.9348683](https://doi.org/10.1109/VTC2020-Fall49728.2020.9348683).
- [14] Mao Y., Clerckx B., Li V. O., Rate-splitting multiple access for downlink communication systems: Bridging, generalizing, and outperforming SDMA and NOMA, EURASIP J Wirel Commun Netw., 2018 (1), 2018. doi: [10.1186/s13638-018-1104-7](https://doi.org/10.1186/s13638-018-1104-7).
- [15] Clerckx B., Joudeh H., Hao C., Dai M., Rassouli B., Rate splitting for MIMO wireless networks: a promising phy-layer strategy for LTE evolution, IEEE Commun. Mag., 54 (5), 98-105, 2016. doi: [10.1109/MCOM.2016.7470942](https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7470942).
- [16] Zhang J., Clerckx B., Ge J., Mao Y., Cooperative rate splitting for MISO broadcast channel with user relaying, and performance benefits over cooperative NOMA, IEEE Signal Process Lett., 26 (11), 1678-1682, 2019. doi: [10.1109/LSP.2019.2942994](https://doi.org/10.1109/LSP.2019.2942994).

- [17] Yin L., Clerckx B., Rate-splitting multiple access for multigroup multicast and multibeam satellite systems, *IEEE Trans. Commun.*, 69 (2), 976-990, 2021. doi: [10.1109/TCOMM.2020.3037596](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.3037596).
- [18] Yang Z., Chen M., Saad W., Shikh-Bahaei M., Optimization of rate allocation and power control for rate splitting multiple access (RSMA), *IEEE Trans. Commun.*, 69 (9), 5988-6002, 2021. doi: [10.1109/TCOMM.2021.3091133](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3091133).
- [19] Singh S. K., Agrawal K., Singh K., Li C.-P., Outage probability and throughput analysis of UAV-assisted rate-splitting multiple access, *IEEE Wireless Commun. Lett.*, 10 (11), 2528-2532, 2021. doi: [10.1109/LWC.2021.3106456](https://doi.org/10.1109/LWC.2021.3106456).
- [20] Ashrafzadeh B., Soleimani-Nasab E., Kamandar M., Uysal M., A framework on the performance analysis of dual-hop mixed FSO-RF cooperative systems, *IEEE Trans. Commun.*, 67 (7), 4939-4954, 2019. doi: [10.1109/TCOMM.2019.2904501](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2904501).
- [21] Wang J. Y., Wang J. B., Chen M., Huang N., Jia L. Q., Guan R., Ergodic capacity and outage capacity analysis for multiple-input single-output free-space optical communications over composite channels, *Opt. Eng.*, 53 (1), 2014. doi: [10.1117/1.OE.53.1.016107](https://doi.org/10.1117/1.OE.53.1.016107).
- [22] Gradshteyn I. S., Ryzhik I.M., *Table of Integrals, Series and Products (7. Baskı)*, Academic Press, New York, A.B.D., 2007.





Sıkıştırılmaz bir sıvıyı varsayan Navier – Stokes denklemlerinin kesin çözümlerinin analizi

Analysis of exact solutions of Navier – Stokes equations assuming an incompressible fluid

Nesij Ünal^{1,*}, Yahya Öz², Tuğrul Oktay³

^{1,2} TUSAŞ – Türk Havacılık ve Uzay Sanayii, AR-GE ve Teknoloji Direktörlüğü, 06980, Ankara, Türkiye

³ Erciyes Üniversitesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, 38039, Kayseri, Türkiye

Öz

Literatürde üç boyutta analitik olarak elde edilmiş olan sıkıştırılmaz ve iraksamasız, yani $\vec{\nabla} \cdot \vec{u}(\vec{x}, t) = 0$ şeklindeki akışları varsayan Navier – Stokes sonuçları günden güne detaylandırılmakta ve genişletilmektedir. Bu amaç için nümerik incelemeler gerçekleştirilmiştir. Literatürde ilgili çalışmalarda, özellikle zamana bağlı viskoziteler $\mu(t)$ araştırılmaktadır. Bu sebepten kaynaklı olarak nümerik analizlerde $\mu(t) < \frac{1}{t}$ için Poincaré haritaları elde edilmiştir. Genel olarak, Navier-Stokes denklemleri, akışkanların hareketini matematiksel olarak tanımlayan temel kısmi diferansiyel denklemlerdir. Bu denklemler, bir akışkanın hızı, basıncı ve yoğunluğu arasındaki ilişkiyi açıklar. İlk denklem, momentum denklemi olarak bilinir ve akışkanın hızının zamanla nasıl değiştiğini belirler. İkinci denklem, kütle denklemi olarak adlandırılır ve akışkanın yoğunluğunun nasıl değiştiğini ifade eder. Üçüncü denklem, enerji denklemi olarak bilinir ve akışkanın enerji değişimini hesaplar. Son denklem ise, sıcaklık ve basınç gibi termodinamik özellikleri ilişkilendirir. Bu kuple denklemler, akışkan dinamiğini ve mühendislik uygulamalarını anlamak için önem arz etmektedir. Bu kapsamda, viskozite için farklı varsayımlar ele alınmaktadır. Üç farklı durum incelenmiştir. Bu varsayımlar; viskozitenin zamana bağlı üst limiti, zamana bağlı alt limiti ve sabit alt limiti kapsamaktadır. Ek olarak, literatür ile ilişkilendirilmiş olan Beltrami denkleminin çözümleri için, ki bu vektör alanları kendi rotasyonlarına paraleldir, belirli akışkanların düzensiz çıkış çizgilerine sahip olmadığına dair kanıtlar sunulmaktadır. Viskozitenin sabit olduğunda bu durum Trkalyan (yani zamana bağlı katlanarak zayıflayan) akışkanlarının dinamiği düzensiz olmadığını kanıtlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Sıkıştırılmaz akış, Navier–Stokes, Trkalyan akışları, Beltrami denklemi

1 Giriş

Akışkanlar mekaniği, doğamızın önemli bir parçası olan sıvıların ve gazların hareketini inceleyen bir bilim dalıdır. Bu alandaki temel bilgiler, birçok endüstriyel ve bilimsel uygulamanın temelini oluşturur. Akışkanların hareketini

Abstract

Navier – Stokes results which assume incompressible fluids and divergence-free flows, i.e. $\vec{\nabla} \cdot \vec{u}(\vec{x}, t) = 0$, obtained analytically for three dimensions in the literature, are expanded. For this purpose, numerical analyses were performed. In related studies, especially time-dependant viscosities $\mu(t)$ were investigated. Therefore, Poincaré maps were obtained for $\mu(t) < \frac{1}{t}$. The Navier-Stokes equations are fundamental partial differential equations that mathematically describe the motion of fluids. These equations establish the relationship between velocity, pressure and density of a fluid. The first equation, known as the momentum equation, determines how the velocity of a fluid changes over time. The second equation, called the mass equation, expresses how the density of the fluid changes. The third equation, the energy equation, calculates the energy changes within the fluid. The fourth equation relates thermodynamic properties such as temperature and pressure. These coupled equations are crucial for understanding fluid dynamics and engineering applications. In this context, different assumptions for the viscosity are considered. Three different cases were examined. These assumptions include a time-dependent upper limit, time-dependent lower limit and constant lower limit of viscosity. In addition, evidence is presented that certain streams of literature-related solutions of the Beltrami equation which are vector fields parallel to their own curl do not have chaotic streaklines. For constant viscosities, this proves that the dynamics of Trkalian (exponentially decreasing with the time) flows are not chaotic.

Keywords: Noncompressible flow, Navier–Stokes, Trkalyan flow, Beltrami equation

tanımlayan temel denklemlerden biri, Jean-Louis Marie Poiseuille ve Claude-Louis Navier tarafından 19. yüzyılın başlarında geliştirilen Navier-Stokes denklemleridir. Bu denklemler; bir akışkanın hızını, basınca ve viskoziteye (akışkanın yapısının içsel sürtünmesi) bağlı olarak tanımlar ve akışkanların davranışını analiz etmek için kullanılır.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: neunal@tai.com.tr (N. Ünal)

Geliş / Received: 03.10.2023 Kabul / Accepted: 15.01.2024 Yayınlanma / Published: 15.04.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1370615

Navier-Stokes denklemleri, karmaşık akışkan hareketlerini modellemek ve anlamak için sıklıkla kullanılan bir araç haline gelmiştir. Birçok mühendislik, fizik, matematik ve bilgisayar bilimi uygulamasında kullanılan bu denklemler; özellikle sıvı dinamiği, havacılık, gemi inşaatı, hava tahmini, tıbbi görüntüleme ve endüstriyel süreçler gibi birçok alanda büyük önem taşır [1].

Navier-Stokes denklemleri, hız denklemleri (momentum denklemleri) ve devir (süreklilik) denklemi olmak üzere temelde iki ana bileşenden oluşur. Hız denklemleri, bir akışkanın hızını ve değişimini tanımlar ve bu değişimi etkileyen dış kuvvetleri, viskoz sürtünmeyi ve basınç farklarını hesaba katar. Devir denklemi ise madde ve momentumun korunumu ilkesine dayanır ve bir akışkanın kütle korunumunu ifade eder [1].

Akışlar, bilimsel ve mühendislik uygulamaları için büyük ilgi görmektedir. Önemli örnek kullanımlar arasında havacılık bilimleri, kan akışları, astrofizik, plazma manyeto-hidro dinamiği, hava için kirlilik analizleri, okyanus akıntıları ve hava tahminlerinin yanı sıra otomobiller, klimalar, fanlar ve borulardaki su akışları yer alır [2-7]. Özellikle havacılık endüstrisinde, kanat etrafındaki davranış platformun uçuş karakteristiği için belirleyici olduğu için akışlar önemli bir rol oynamaktadır. Bununla birlikte, temel denklemlerin matematiksel yapısı oldukça karmaşık olduğundan, nicel sonuçların elde edilmesi son derece zorlaşmaktadır. Sonuç olarak; akışkanlar mekaniği üzerine araştırma, yüksek performanslı bilgisayarlar için ana çalışma alanlarından biridir [8, 9].

Lineer-viskoz Newton akışkanlarının akışları; enerji, momentum ve kütle için korunum yasalarından elde edilen Navier – Stokes momentum denklemleri ile karakterize edilirken, Euler denklemleri viskoz olmayan akışları tarif eder [10, 11]. Temel olarak Navier-Stokes denklemleri, bir akışın içindeki iç gerilimin basınç ve difüz viskoz terimi ile ilişkili olduğu gözlemlerle birlikte, akış hareketi için Newton'un ikinci yasasını beyan eder. Euler denklemleri ise viskoz olmayan akışkanları tarif etmektedir [10]. Bu denklemler astrofizik kullanılarak dahi türetilmektedirler [12]. Türbülans teorisinin aynı zamanda Navier – Stokes momentum denklemleri [13] tarafından incelenen akışkanlar mekaniğinin önemli bir alanı olduğu ayrıca bilinmektedir. Ek olarak, manyetik hidrodinamik analizleri Maxwell denklemlerinin kullanımı ile gerçekleştirmek mümkündür.

Navier – Stokes momentum denklemlerini sayısal yöntemlerle incelemek için modern yaklaşım gelişmiş hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin benimsenmesidir. Bununla birlikte, bazı fonksiyonel kullanımlarda, bu gelişmiş sayısal analizlere rağmen sonuçların elde edilmesi çok karmaşık hale gelebilir, öyle ki araştırmalar denklemlerin çözümlerini oluşturmak için istatistiksel yaklaşımlara bağlı olabilmektedir. Bununla birlikte, kuantum hesaplamaları ve doğrudan Monte Carlo yaklaşımları büyük önem taşımaktadır [14, 15].

Ayrı bir yöntem, \mathbb{R}^3 veya $\mathbb{R}^3/\mathbb{Z}^3$ üzerindeki Navier – Stokes çözümlerinin varlığı ve doğruluğu gibi temel özellikleri türetmek için ilişkili denklemlerin analitik olarak incelenmesidir. Buna göre, analitik çözümler oluşturmak oldukça önemlidir ve özel koşullar için çalışmalar

gerçekleştirilmiştir [16-20]. Ayrıca, analitik sonuçlara göre bir uçak tasarlamak gibi pratik uygulamalar için de önem taşımaktadır [21].

Bu çalışmada, literatürde analitik olarak elde edilmiş olan sonuçlar [22] genişletilmektedir ve nümerik olarak incelenmektedir. Bahsi geçen analitik çözümlerinin Poincaré haritaları elde edilmiş ve kesişim noktaları görselleştirilmiştir. Ek olarak, Beltrami denkleminin çözümleri için Trkalyan akışlarının düzensiz çıkış çizgilerine sahip olmadığına dair kanıtlar da sunulmaktadır. Uzun yıllardır literatürde bilinen Trkalyan akışları [23] için bu unsur elde edilmiştir. Bu sonuçları elde etmek için geleneksel metodolojiler kullanılmaktadır, zira nümerik metotlar farklı bağlılıkları ortaya çıkartmakta zorlanmaktadır. Analitik çözümlerin, kararlılık analizleri ve sayısal çözümlerin kontrolleri amacıyla kullanılabilmesi ve aynı zamanda çeşitli fiziksel parametreler arasındaki ilişkileri ortaya çıkarabilmesi nedeniyle oldukça ilgi çekicidir. Bu sebeplerden kaynaklı olarak hem analitik hem nümerik stratejiler güdülererek farklı sonuçlar elde edilmiştir.

2 Materyal ve metot

Sapmadan bağımsız akışlar (yani $\vec{\nabla} \cdot \vec{u}(\vec{x}, t) = 0$) için sıkıştırılmaz Navier–Stokes momentum denklemi; konum vektörü \vec{x} , zaman t , sabit yoğunluk ρ , basınç $p(\vec{x}, t)$, zamana bağlı dinamik viskozite $\mu(t)$, yer çekimsel potansiyel $\varphi(\vec{x})$ ve akış hızı $\vec{u}(\vec{x}, t)$ dikkate alınarak belirtilmiş şekilde geçerlidir.

$$\partial_t \vec{u}(\vec{x}, t) + (\vec{u}(\vec{x}, t) \cdot \vec{\nabla}) \vec{u}(\vec{x}, t) = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p(\vec{x}, t) + \frac{\mu(t)}{\rho} \Delta \vec{u}(\vec{x}, t) + \vec{\nabla} \varphi(\vec{x})$$

Bu denklemin çözümü, literatürde belirli varsayımlar kullanılarak elde edilmiştir [22]. Bu kapsamda değişkenlerin ayrılması, yani;

$$\vec{u}(\vec{x}, t) = f(t) \vec{U}(\vec{x}),$$

$f(t)$ 'nin zamana bağlı bir fonksiyon olması ve $\vec{U}(\vec{x})$ 'in Beltrami vektör alanı olması, yani kendi rotasyonuna paralel olması, varsayımlar sonucu;

$$\vec{u}(\vec{x}, t) = c_4 e^{-\frac{\lambda^2}{\rho} \int_0^t d\tau \mu(\tau)} \vec{U}(\vec{x}),$$

$$p(\vec{x}, t) = c_3 + \rho \varphi(\vec{x}) - \frac{\rho}{2} \vec{u}^2(\vec{x}, t)$$

olarak elde edilmiştir. c_3 , c_4 ve λ matematiksel diferansiyel denklem çerçevesinden kaynaklanan sabitlerdir. Beltrami vektör alanı; $\vec{U}(\vec{x})$ yerine kaynak [22]'de türetilmiş olan;

$$\vec{F}_4(\vec{x}, \xi, \zeta) = a_1 \vec{e}_1 + a_2 \vec{e}_2 + a_3 \vec{e}_3,$$

$$a_1 = \frac{1}{r^4} \left(\left(\frac{3-r^2}{r} \sin r - 3 \cos r \right) \cdot ((1-2\xi)x + yz + \zeta(y^2 - z^2)) + \frac{x}{r^2} \left(\frac{6r^2-15}{r} \sin r - (r^2-15) \cos r \right) \cdot (z^2 - \xi(y^2 + z^2) + 2\zeta yz) \right),$$

$$a_2 = \frac{1}{r^4} \left(\left(\frac{3-r^2}{r} \sin r - 3 \cos r \right) \cdot ((1+\xi)y - (1-\xi)xz - \zeta(3z + xy)) + \frac{1}{r^2} \left(\frac{6r^2-15}{r} \sin r - (r^2-15) \cos r \right) \cdot ((\xi x^2 + z^2)y + \zeta z(y^2 - x^2 - z^2)) \right),$$

$$a_3 = \frac{1}{r^4} \left(\left(\frac{3-r^2}{r} \sin r - 3 \cos r \right) \cdot ((\xi-2)z - \xi xy - \zeta(3y - xz)) + \frac{1}{r^2} \left(\frac{6r^2-15}{r} \sin r - (r^2-15) \cos r \right) \cdot (((\xi-1)x^2 - y^2)z + \zeta y(z^2 - x^2 - y^2)) \right)$$

vektör alanının kullanımı ile;

$$\dot{r}(t) = \frac{c_4}{r^4(t)} e^{-\frac{\lambda^2}{\rho} \int_0^t d\tau \mu(\tau)} \cdot \left(\frac{3-r^2(t)}{r(t)} \sin r(t) - 3 \cos r(t) \right) \cdot ((\xi-2) \cos^2 \theta(t) - \frac{\xi-2+3\xi \cos(2\phi(t))}{2} \sin^2 \theta(t) - 3\zeta \sin(2\theta(t)) \sin \phi(t)) \quad (1)$$

küresel koordinat sistemi kullanımı, yani $r(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t) + z^2(t)}$, $\theta(t)$, $\phi(t)$ ve $\vec{x} = (x(t) \ y(t) \ z(t))^T$, ile elde edilmiştir. Bu denklemin nümerik analizi kartezyen koordinatlar kullanılarak 3. bölümde sunulmaktadır. Bu kapsamda;

$$\tan r_j = \frac{3r_j}{3-r_j^2}, \quad j = 1, 2, \dots$$

denklemini sağlayan r_j yarıçaplı tüm küreler, bahsi geçen Beltrami vektör alanı $\vec{F}_4(\vec{x}, \xi, \zeta)$ için değişmez alt manifoldlar olduğu da literatürde gösterilmiştir [22]. Zira bu durumda küresel birim vektörü \vec{e}_r dikkate alındığında

$$\vec{e}_r \cdot \vec{F}_4(\vec{x}, \xi, \zeta) \Big|_{r=r_j} = 0$$

denklemini geçerlidir. Bahsi geçen analiz için ilk iki kürenin nümerik yarıçapları $r_1 \approx 5.76346$ ve $r_1 \approx 9.09501$ olarak belirlenmiştir.

2.1 Sonsuz uzunlukta çıkış çizgileri

Kaynak [22]'de elde edilmiş sonuçları incelemek adına;

$$\mu(t) \leq \frac{1}{\lambda^2 t}, \quad t \geq t_1 > 0$$

koşulu varsayıldığında;

$$\int_0^t d\tau \mu(\tau) \leq \int_0^{t_1} d\tau \mu(\tau) + \frac{1}{\lambda^2} \ln \frac{t}{t_1}$$

$$\Rightarrow e^{-\frac{\lambda^2}{\rho} \int_0^t d\tau \mu(\tau)} \geq e^{-\frac{\lambda^2}{\rho} \int_0^{t_1} d\tau \mu(\tau) - \frac{1}{\rho} \ln \frac{t}{t_1}}$$

denklemleri elde edilmektedir. Bu durum ise sabit bir küme $S \subset \mathbb{R}^3$ için $|\vec{u}(\vec{x}, t)| \geq B > 0$ varsayıldığında;

$$\int_0^t d\tau |\vec{u}(\vec{x}, \tau)| \geq B \left(\ln \frac{t}{t_1} \cdot e^{-\frac{\lambda^2}{\rho} \int_0^{t_1} d\tau \mu(\tau) + \frac{\ln t_1}{\rho}} \right)$$

denkleminin açığa çıkmasını sağlamaktadır. Yani $t \rightarrow \infty$ durumunda çıkış çizgilerinin uzunlukları $\int_0^t d\tau |\vec{u}(\vec{x}, \tau)|$ da sonsuza gitmektedir. Ek olarak, kaynak [22]'de tanımlanmış olan Reynolds sayısı bu varsayımlarla $Re = \infty$ sonucuna yol açmaktadır. $0 \leq r \leq r_1$ olarak tanımlanan kürede ve $r_1 \leq r \leq r_2$ olarak tanımlanan kabukta çıkış çizgileri bu sebeplerden kaynaklı olarak düzensiz davranış sergilemektedir.

2.2 Sonlu uzunlukta çıkış çizgileri

Kaynak [22]'de $\mu(t) \geq \tilde{\mu} > 0$ varsayımı, yani tüm sabit viskoziteler için;

$$\int_0^\infty dt |\vec{u}(\vec{x}(t), t)| \leq \frac{\rho}{|\lambda|} Re$$

denklemleri türetilmiştir. Yani çıkış çizgisinin üst limiti bulunmaktadır. Herhangi bir akışkan parçacığı tarafından t süresinden sonra geçen bir çıkış çizgisinin kalan uzunluğu $t \rightarrow \infty$ için azalmaktadır ve aşağıdaki denklem ortaya çıkmaktadır;

$$\int_t^\infty d\tau |\vec{u}(\vec{x}(\tau), \tau)| \leq \frac{\rho}{|\lambda|} e^{-\frac{\lambda^2 \tilde{\mu} t}{\rho}} Re \quad (2)$$

Bu sebepten dolayı, bahsi geçen viskoziteler için sunulmuş olan Trkalyan akışlarının düzensiz çıkış çizgilerine sahip olmadığı gözlemlenmektedir. Ayrıca

viskoz akışkanlar dinamiğinin **Denklem (2)**'den kaynaklı olarak bir belirli sürenin üstünde donduğu aşıkardır zira bu denklemde ilgili zaman noktasında başlayan entegralin üst limiti vardır. Bu üst limit ise büyüyen zaman t için üstel şekilde küçülmektedir.

2.3 Viskozite için üçüncü varsayım

Ayrı bir varsayım olan

$$\mu(t) \geq \frac{m}{t}, \quad m > \frac{\rho}{\lambda^2}, \quad t \geq t_2 > 0 \quad (3)$$

durumu için ise;

$$\begin{aligned} |\vec{u}(\vec{x}(t), t)| &\leq \tilde{\mu}|\lambda| \operatorname{Re} e^{-\frac{\lambda^2}{\rho} \int_0^t d\tau \mu(\tau)} \\ &= \tilde{\mu}|\lambda| \operatorname{Re} e^{-\frac{\lambda^2}{\rho} (m \ln \frac{t}{t_2} + \int_0^{t_2} d\tau \mu(\tau))} \\ &= \tilde{\mu}|\lambda| \operatorname{Re} \frac{e^{-\frac{\lambda^2}{\rho} (\int_0^{t_2} d\tau \mu(\tau) - m \ln t_2)}}{t^{\frac{\lambda^2 m}{\rho}}} \end{aligned}$$

ortaya çıkmaktadır. $m > \frac{\rho}{\lambda^2}$ kullanıldığında ise $\frac{\lambda^2 m}{\rho} > 1$ olduğu görülmektedir. Bu denklemler kullanılarak çıkış çizgilerinin uzunlukları incelendiğinde;

$$\begin{aligned} \int_0^\infty dt |\vec{u}(\vec{x}, t)| &\leq \tilde{\mu}|\lambda| \operatorname{Re} \int_0^\infty dt e^{-\frac{\lambda^2}{\rho} \int_0^t d\tau \mu(\tau)} \\ &\leq \tilde{\mu}|\lambda| \operatorname{Re} \left(\int_0^{t_2} dt' e^{-\frac{\lambda^2}{\rho} \int_0^{t'} d\tau \mu(\tau)} \right. \\ &\quad \left. + e^{-\frac{\lambda^2}{\rho} (\int_0^{t_2} d\tau \mu(\tau) - m \ln t_2)} \cdot \int_{t_2}^\infty \frac{dt}{t^{\frac{\lambda^2 m}{\rho}}} \right) \\ &= \tilde{\mu}|\lambda| \operatorname{Re} \left(\int_0^{t_2} dt' e^{-\frac{\lambda^2}{\rho} \int_0^{t'} d\tau \mu(\tau)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{e^{-\frac{\lambda^2}{\rho} (\int_0^{t_2} d\tau \mu(\tau) - m \ln t_2)}}{\left(\frac{\lambda^2 m}{\rho} - 1\right) t_2^{\frac{\lambda^2 m}{\rho} - 1}} \right) \end{aligned}$$

denklemleri üst sınır olarak türetilmektedir. Sonuç olarak varsayım (3)'deki viskoziteler için düzensiz çıkış çizgilerinin olmadığı ortaya çıkmaktadır. Bu varsayım ise oldukça önemlidir çünkü bu durumda Reynolds sayısı sıfırdır ($\operatorname{Re} = 0$). Yani Reynolds sayısının sıfır olduğu bir durum için düzensiz çıkış çizgilerinin olmadığı ispatlanmıştır.

Özet olarak; sonuçlar incelendiğinde belirli varsayımlar için çıkış çizgilerinin analizi ile türbülanssız dinamikler elde

edilmiştir. Bu durum önem arz etmektedir çünkü literatürde türbülanslı akışlar çok yaygın iken [26] türbülanssız sonuçlar daha nadir görünmektedir.

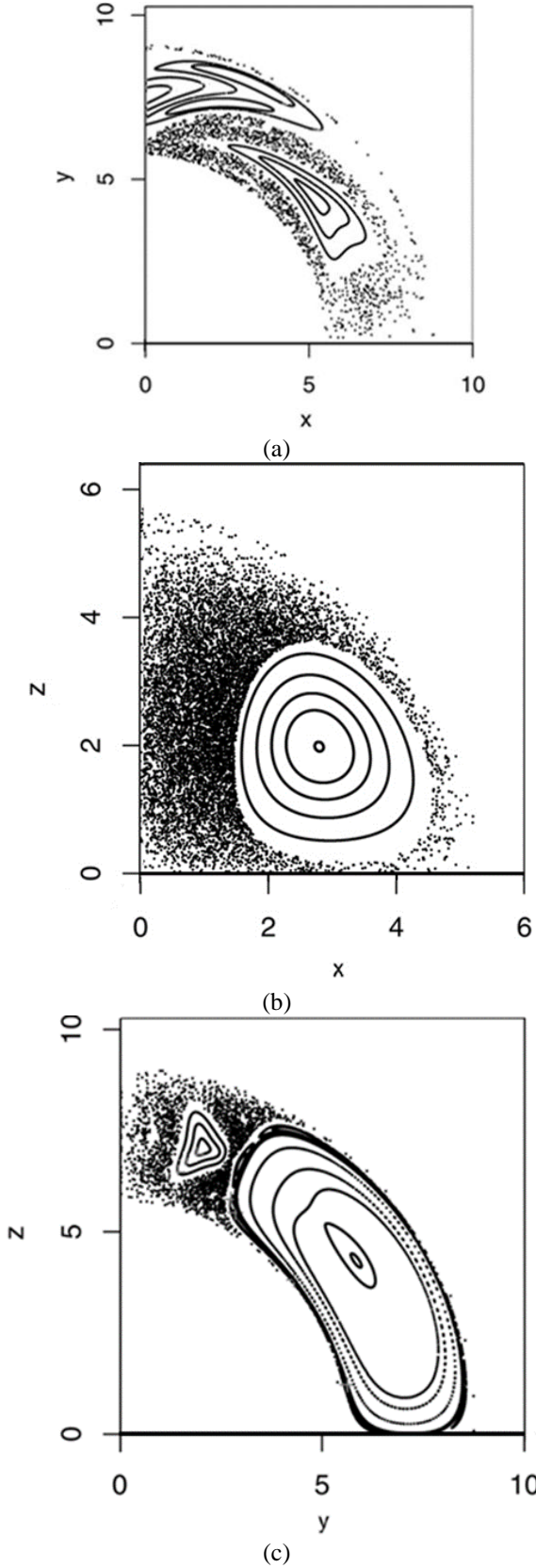
2.4 Nümerik metodoloji

Poincaré haritalarını elde etmek için bağımlı değişkenlerden biri bağımsız değişkene dönüştürülmektedir. Bu metod, yaklaşımın tek adımda gerçekleştirilmesine olanak tanıyan ve böylece klasik yöntemlerle [24] ilişkili hata birikimini önleyen bir denklem seti sağlar. Bu dönüşümü sadece son aşamada uygulamak yerine her zaman faz değişkenlerinden birinin bağımsız olması şeklinde uygulanmaktadır. Ardından Poincaré haritasını oluşturan örgü noktaları dizisini elde eden integral için Euler metodu kullanılmıştır. Bahsi geçen ilgili yaklaşım literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır [25].

3 Nümerik bulgular ve tartışma

Denklem sistemi (1) tarafından açıklanan dinamik, esas olarak ξ ve ζ parametrelerinin değerlerine bağlıdır. $\xi = \frac{1}{8}$ ve $\zeta = \frac{1}{20}$ için sonuçlar **Şekil 1**'de gösterilmektedir. $\lambda = \rho = 1$ seçilerek her çıkış çizgisinin uzunluğu $t \rightarrow \infty$ ile beraber sonsuza gitmesi, $\mu(t) < \frac{1}{t}$ denkleminde kaynaklı olarak kesinleştirilmiştir. **Şekil 1(c)**, $r_1 \leq r \leq r_2$ kabuğunun içinde $x = 0$ düzlemi ile 7 farklı yörüngenin Poincaré harita kesişimlerini göstermektedir. Bu yörüngelerin dördü belirli alt alanlarda yoğunudur ve her biri seçilmiş zaman aralığında $x = 0$ düzlemine 2000 defadan fazla çarpmaktadır. **Şekil 1(b)**, bu yörüngelerin $r_1 \leq r \leq r_2$ küresel kabuğunun içindeki $z = 0$ düzlemi ile kesişim noktalarını göstermektedir. Geri kalan yörüngeler, **Şekil 1(a)** ve **(c)**'deki kapalı eğrilerde $x = z = 0$ düzlemlerini kesen değişmez toruslar (toriler) \mathbb{T}^2 'ye aittir. **Şekil 1(a)**, $0 \leq r \leq r_1$ içindeki $y = 0$ düzlemi ile onbir farklı yörüngenin kesişim noktasını göstermektedir. Bir yörünge, $y = 0$ düzlemine seçilmiş zaman aralığında 10.000 defadan fazla çarpmaktadır ve bağlı olan alt alanda yoğunudur. Diğer yörüngeler, **Şekil 1(a)**'daki kapalı eğrilerde, $y = 0$ düzlemiyle kesişen değişmez toruslar \mathbb{T}^2 'ye aittir. Bu sonuçlar, dinamiklerin bütünlük olmadığını ve **(1) denkleminde** ait akışta, doğrudan olmayan vektörler için düzensiz çıkış çizgilerinin varlığını ve ayrıca istikrarsızlığını gösterir. Bu çıkış çizgileri zamana bağlı viskoziteler için kabuk ve küre içinde belirlenmiştir. Bazı çıkış çizgileri iki boyutlu toruslar \mathbb{T}^2 üzerinde yoğunken, komşu çıkış çizgileri belirli üç boyutlu bölgelerde yoğunudur.

Yapılan analizler alt limitli viskoziteler için Trkalyan akışlarını [23] da kapsamaktadır. Buradaki çıkış çizgilerinin sonlu uzunluklara sahip olduğunu ve bu nedenle düzensiz bir davranış göstermediği anlaşılmaktadır. Yani Trkalyan akışları sabit alt limitli viskoziteler göz önünde bulundurulduğunda kaotik davranış veya türbülans sergileyememektedir. Bunun aksine literatürde farklı viskoziteler incelenmiş ve sonlu uzunluklar tespit edilmemiştir [27].



Şekil 1. (a) $z = 0$ için $0 \leq r \leq r_1$, (b) $y = 0$ için $r_1 \leq r \leq r_2$ ve (c) $x = 0$ için $r_1 \leq r \leq r_2$ aralığında Poincaré haritaları

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, literatürde yakın zamanda elde edilmiş sıkıştırılmaz ve iraksamasız akışlar varsayan analitik Navier – Stokes sonuçları incelenmiştir. Üç farklı viskozite durumu incelenmiştir. Bu varsayımlar viskozitenin zamana bağlı üst limitini $\mu(t) \leq \frac{1}{\lambda^2 t}$, zamana bağlı alt limitini $\mu(t) \geq \frac{m}{t}$ ve sabit alt limitini $\mu(t) \geq \bar{\mu}$ kapsamaktadır. İlk durum haricinde çıkış çizgilerinin uzunluklarının sınırlı olduğu kanıtlanmıştır. Özellikle sabit alt limit, Trkalyan akışlarını da kapsamaktadır. Buradaki tüm çıkış çizgilerinin sonlu uzunluklara sahip olduğunu ve bu nedenle düzensiz bir davranış göstermediği kanıtlanmıştır. Yani Trkalyan akışları sabit alt limitli viskoziteler göz önünde bulundurulduğunda asla kaotik davranış veya türbülans sergileyememektedir. Son olarak, çizgilerin dinamiği nümerik olarak incelenmiştir. Bunun için, sıkıştırılmaz ve iraksamasız akışlar varsayan analitik Navier – Stokes sonuçlarının Poincaré haritaları elde edilmiştir. $r_1 \leq r \leq r_2$ kabuğunun içinde $x = 0$ düzlemi ile 7 farklı yörünge Poincaré harita keşişimleri elde edilmiştir. Her biri $x = 0$ düzlemine 2000 defadan fazla çarpmaktadır. Bir yörünge $y = 0$ düzlemine seçilmiş zaman aralığında 10.000 defadan fazla çarpmaktadır. Bu sonuçlar, dinamiklerin bütünlük olmadığını ve akışta kaotik çıkış çizgilerinin varlığını göstermektedir. Bu durum ise bahsi geçen viskozite varsayımları geçerli olmadığında davranışın doğal olarak düzensizleştiğini kanıtlamaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 11

Kaynaklar

- [1] D. J. Acheson, Elementary Fluid Dynamics. Oxford University Press, Oxford, 1990.
- [2] B. Bilalov, T. Gasymov and A. Guliyeva, On the solvability of the Riemann boundary value problem in Morrey--Hardy classes. Turkish Journal of Mathematics, 40, 5, 14, 1085 – 1101, 2016. <https://doi.org/10.3906/mat-1507-10>
- [3] C. X. Li and S. Liang Wu, Eigenvalue distribution of relaxed mixed constraint preconditioner for saddle point problems. Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics, 45, 6, 1705 – 1718, 2016. <https://doi.org/10.15672/HJMS.20164515686>
- [4] A. Pınarbaşı and M. İmal, Nonisothermal channel flow of a non-newtonian fluid with viscous heating. International Communications in Heat and Mass Transfer, 29, 8, 1099 – 1107, 2002. [https://doi.org/10.1016/s0735-1933\(02\)00438-4](https://doi.org/10.1016/s0735-1933(02)00438-4)
- [5] F. Reetz, T. Kreilos and T. M. Schneider, Exact invariant solution reveals the origin of self-organized oblique turbulent-laminar stripes. Nature Communications, 10, 2277, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10208-x>
- [6] M. Scholle, P. H. Gaskell and F. Marner, Exact integration of the unsteady incompressible Navier-Stokes equations, gauge criteria, and applications.

- Journal of Mathematical Physics, 59, 4, 2018. <https://doi.org/10.1063/1.5031119>
- [7] N. Uygun, Effect of hall current on the MHD fluid flow and heat transfer due to a rotating disk with olauniform radial electric field. Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics, 44 (6), 1445 – 1462, 2015. <https://doi.org/10.15672/HJMS.2015449675>
- [8] N. Ünal, Y. Öz and T. Oktay, Conceptual design modeling by the novel aircraft conceptual design and analysis system (ACDAS). Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 95, 5, 799 – 813, 2023. <https://doi.org/10.1108/AEAT-02-2022-0056>
- [9] A. Urichuk, Y. Oez, A. Klümper and J. Sirker, The spin Drude weight of the XXZ chain and generalized hydrodynamics. SciPost Physics, 6, 1, 005, 2019. <https://doi.org/10.21468/SciPostPhys.6.1.005>
- [10] J. D. Gibbon, The three-dimensional Euler equations: Where do we stand?. Physica D: Nonlinear Phenomena, 237, 14–17, 1894 – 1904, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2007.10.014>
- [11] H. Gümral, Lagrangian description, symplectization, and Eulerian dynamics of incompressible fluids. Turkish Journal of Mathematics, 40, 5, 925 – 940, 2016. <https://doi.org/10.3906/mat-1410-38>
- [12] V. I. Arnold, S. F. Shandarin and Y. B. Zeldovich, The large scale structure of the universe I. General properties. Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics, 20, 1 – 2, 111 – 130, 1982. <https://doi.org/10.1080/03091928208209001>
- [13] A. M. Polyakov, Turbulence without pressure. Physical Review E, 52, 6, 6183 – 6188, 1995. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.52.6183>
- [14] F. Gaitan, Finding flows of a Navier–Stokes fluid through quantum computing. NPJ Quantum Information, 6, 61, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41534-020-00291-0>
- [15] J. Ou and J. Chen, Hypersonic Aerodynamics of Blunt Plates in Near-Continuum Regime by Improved Navier–Stokes Model. AIAA Journal, 58, 9, 4037 – 4046, 2020. <https://doi.org/10.2514/1.J059333>
- [16] Liu, M., Li, X. and Zhao, Q. Exact solutions to Euler equation and Navier–Stokes equation. Z. Angew. Math. Phys, 70, 43, 1 – 13, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00033-019-1088-0>
- [17] T. Pedergnana and et al., Explicit unsteady Navier–Stokes solutions and their analysis via local vortex criteria. Physics of Fluids, 32, 4, April 2020. <https://doi.org/10.1063/5.0003245>
- [18] Prosviryakov, E.Y. new class of exact solutions of Navier–Stokes equations with exponential dependence of velocity on two spatial coordinates. Theor Found Chem Eng, 53, 107 – 114, 2019. <https://doi.org/10.1134/S0040579518060088>
- [19] M.J. Zhang and W.D. Su, Exact solutions of the Navier–Stokes equations with spiral or elliptical oscillation between two infinite planes. Physics of Fluids, 25, 7, 2013. <https://doi.org/10.1063/1.4813629>
- [20] Y. Öz, Rigorous investigation of the Navier–Stokes momentum equations and correlation tensors. AIP Advances, 11, 5, 055009, 2021. <https://doi.org/10.1063/5.0050330>
- [21] E. Varley and B. R. Seymour, Applications of exact solutions to the Navier–Stokes equations: free shear layers. Journal of Fluid Mechanics, 274, 267 – 291, 2006. <https://doi.org/10.1017/S0022112094002120>
- [22] Y. Öz, Novel exact solutions to Navier–Stokes momentum equations describing an incompressible fluid. Turkish Journal of Mathematics, 46, 8, 3192 – 3200, 2022. <https://doi.org/10.55730/1300-0098.3327>
- [23] V. Trkal, A remark on the hydrodynamics of the viscous fluids. Journal for the Cultivation of Mathematics and Physics, 48, 3, 302 – 311, 1919. <https://doi.org/10.21136/CPMF.1919.109099>
- [24] M. Henon, On the numerical computation of Poincaré maps. Physica D: Nonlinear Phenomena, 5, 2 – 3, 412 – 414, 1982. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(82\)90034-3](https://doi.org/10.1016/0167-2789(82)90034-3)
- [25] W. Tucker, Computing accurate Poincaré maps. Physica D: Nonlinear Phenomena, 171, 3, 127 – 137, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0167-2789\(02\)00603-6](https://doi.org/10.1016/S0167-2789(02)00603-6)
- [26] P. D. Huck, N. Machicoane and R. Volk, Lagrangian acceleration timescales in anisotropic turbulence. Physical Review Fluids, 4, 6, 064606, 2019. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.4.064606>
- [27] K. Whitehead and R. Gray, Generation and development of a viscous vortex ring. 10th Aerospace Sciences Meeting, San Diego, USA, 2012. <https://doi.org/10.2514/6.1972-151>





Farklı derin sinir ağı modelleri birleştirilerek yakın kızılötesi görüntülerde yüz tespiti

Face Detection in near infrared images by ensembling different deep neural networks

Ahmet Ünlühisarcıklı^{1,*}, Ahmet Nusret Toprak²

¹ Kayseri Üniversitesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

² Erciyes Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

Öz

Yüz tespiti, güvenlik, sağlık, endüstri, biyometri gibi alanlarda kritik bir rol oynamaktadır. Bahsi geçen alanlarda, aydınlatma durumundan bağımsız olarak yüz tespitinin doğru ve verimli bir şekilde gerçekleştirilebilmesi büyük öneme sahiptir. Ancak, yetersiz aydınlatma koşullarında verimli bir şekilde yüz tespiti yapmak zor olabilmektedir. Bu problem doğrultusunda bu çalışmada, yetersiz aydınlatma koşullarında dahi verimli çalışabilen, yakın kızılötesi görüntüler üzerinde yüz tespitine odaklanan bir yaklaşım sunulmaktadır. Bu amaçla öncelikle literatürde iyi bilinen sekiz yüz tespiti derin sinir ağı modeli belirlenmiş ve yakın kızılötesi görüntülerdeki başarımlarını ortaya koymak amacıyla görsel ve sayısal olarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca ilgili yöntemlerin çalışma zamanlarının karşılaştırmasına yönelik deneyler CPU ve GPU ortamında gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında önerilen yaklaşım birden fazla yüz tespiti modelinin ürettiği sınırlayıcı kutu topluluklarının beraber analiz edilmesi ile daha başarılı ve daha kapsayıcı yeni sınırlayıcı kutular üretilebileceği ilkesine dayanmaktadır. Buradan hareketle, Kombinasyonel Oylama ve Maksimum Olmayan Ortalama adları verilen iki yeni sınırlayıcı kutu belirleme yöntemi önerilmektedir. Önerilen yöntemler literatürdeki sınırlayıcı kutu belirleme yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Kombinasyonel Oylama yönteminin, ürettiği %93,6 doğruluk değeriyle literatürdeki sınırlayıcı kutu belirleme yöntemlerinden daha başarılı sonuçlar ortaya koyduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Yüz tespiti, Yakın kızılötesi görüntüler, Sınırlayıcı kutu topluluğu birleştirme

1 Giriş

Yüz tespiti yöntemleri, sayısal görüntüler ile videolarda bulunan insan yüzlerini tanımlamak ve konumlarını belirlemek için genellikle makine öğrenimi ve derin öğrenme tekniklerinden yararlanan yöntemlerdir. Bu yöntemler, verilen görüntüde insan yüzü olup olmadığını ve varsa bu yüzlerin konumlarını tespit etmeyi amaçlamaktadır.

Günümüzde yüz tespiti yöntemleri; güvenlik sahasında, sınır kontrolünde, mobil cihazlarda pazarlamada,

Abstract

Face detection plays a crucial role in various areas such as security, healthcare, industry, biometrics, etc. It is essential to perform face detection accurately and efficiently in the mentioned areas regardless of the lighting conditions. However, detecting faces in poor lighting conditions can be challenging. To address this issue, this study presents an approach focusing on face detection on near infrared images, which can work efficiently even in insufficient lighting conditions. For this purpose, first of all, eight state-of-the-art face detection models in the literature were determined and compared visually and numerically to reveal their performance in near infrared images. Additionally, experiments were carried out in CPU and GPU environments to compare the running times of the face detection methods. The approach proposed in this study is based on the principle that a more successful and inclusive bounding-box can be produced by using a bounding-box ensemble generated by more than one face detection model. Based on this, two new bounding-box ensemble methods called Combinational Voting and Non-Maximum Averaging are proposed. The proposed methods are compared with bounding-box ensemble methods in the literature. Combinational Voting produces more successful results than the other methods in the literature, with an accuracy rate of 93.6%.

Keywords: Face detection, Near-infrared images, Bounding-box ensemble

fotoğrafçılıkta, sağlık sektöründe ve insan-bilgisayar etkileşiminin olduğu daha birçok alanda önemli rol oynamaktadır [1]. Bahsi geçen alanlarda gerçekleştirilen yüz tespiti işlemlerinin, uygun aydınlatma şartlarında yapılabilirdiği gibi yetersiz aydınlatma şartlarında da yapılabilmesi gerekmektedir. Örneğin, bir sınır noktasında geçiş kontrolü sırasında veya seyir halindeki araç içinde hem gündüz hem de gece vakitlerinde yüz tespiti yapılabilmesi kritik önem arz etmektedir. Literatürde yetersiz aydınlatma

şartları altında yüz tespiti yapılmasına yönelik oldukça az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar genellikle, girdi görüntülerin yüz tespiti aşaması öncesinde görüntü işleme operatörleri kullanılarak iyileştirmesine yönelik yaklaşımlardır.

Cho vd. çalışmalarında [2], düşük ışık altında yüz tespiti problemine çözüm aramaktadır. Gece görüşlü kamera ile elde edilmiş görüntülere odaklanılmış çalışmada, karanlık görüntüleri daha aydınlık ve anlaşılabilir hale getirmek üzere görüntü işleme operatörleri uygulanmaktadır. Daha aydınlık hale getirilen görüntü içerisinde, öncelikle insan vücudu tespit edilmekte, ardından, tespit edilen insanın üst yarısı çıkarılmaktadır. Çıkarılan bölge üzerine, omurga ağ olarak VGG Net-16 modelinin kullanıldığı ve R-CNN yaklaşımının benimsendiği yüz algılayıcısı uygulanarak yüz tespiti yapılmaktadır.

Li vd. [3], gece vakitleri gibi yetersiz aydınlatma koşullarında yapılan yüz tespiti işleminin zorluğuna değinerek, gerçek zamanlı çalışabilecek bir yüz algılama yaklaşımı önermiştir. Önerilen çalışmada, öncelikle girdi karanlık görüntünün kontrastını artırmak için histogram eşitleme (histogram equalization) uygulanmıştır. İkinci aşama olarak, iki piksel değeri arasındaki farkların karşılaştırıldığı İleri Derece Normalleştirilmiş Piksel Farkı (Promotion Normalized Pixel Difference, PRO-NPD) [4] yöntemi kullanılmıştır. Son olarak ise, PRO-NPD neticesinde elde edilen değerlerin en uygun alt kümesini ve kombinasyonlarını öğrenmek için ikinci dereceden derin ağaç (deep quadratic tree) yaklaşımı benimsenmiştir. Böylece, girdi olarak verilen karanlık gece görüntülerinin iyileştirilmesi ve elde edilen görüntüler üzerinde yüz tespitinin yapılması gaye edinilmiştir.

Wang vd. [5] tarafından önerilen Yüksek-Düşük Adaptasyonu (High-Low Adaptation, HLA) başlıklı çalışmada, karanlık (düşük değerli) piksel değerlerinin artırılması, aydınlık (yüksek değerli) piksel değerlerinin ise azaltılması yaklaşım benimsenmektedir. Çift yönlü olarak çalışan bu yaklaşım, her iki durumun da birbirine yaklaşarak, yüz tespiti için daha verimli olan aydınlatma değerlerine yaklaşımını sağlamaya çalışmaktadır. Geliştirilen yapı kapsamındaki test ve karşılaştırma süreçlerinde Çift Çekim Yüz Algılayıcısı (Dual Shot Face Detector, DSFD) [6] kullanılmıştır.

Çalışmalarda görüleceği üzere, yetersiz aydınlatma durumlarında verimli bir şekilde yüz tespiti yapılamaması problemine yönelik çalışmalar genel olarak girdi görüntülerin iyileştirilmesi prensibine dayanmaktadır. Ancak kullanılan görüntü iyileştirme yöntemleri, ilave işlem gücü ihtiyacı ve işlem süresi getirmektedir. Ayrıca, araç içi gibi ortamlarda kullanıcının görüntüsünün gerçek zamanlı olarak alınması gereken durumlarda, gece görüşlü kamera kullanıcıyı rahatsız edici niteliktedir. Diğer taraftan, yetersiz ışık altında da yüz tespiti yapılabilmesini sağlamak amacıyla yakın kızılötesi kameralar kullanılabilir. Bu çalışmada, karanlık gece görüntülerinin iyileştirilmesi ve elde edilen görüntüler üzerinde yüz tespitinin yapılması gaye edinilmiştir.

Dash vd. [7]; farklı kafa pozisyonu, arka plan ve aydınlatma koşulu gibi kızılötesi görüntülerde yüz tespit yöntemlerinin başarımını etkileyebilecek etkenleri araştıran bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, kızılötesi görüntülerde yüz tespiti için bahsi geçen etkenlerin olumsuz

etkilerini azaltacak yeni bir yüz tespiti yöntemi önermişlerdir. Önerilen yöntemde; aydınlatma koşulları ve algılayıcı kaynaklı yetersiz ışık problemiyle başa çıkmak için görüntü iyileştirme teknikleri ve Hızlı Ardışık Ortalama Niceleme Dönüşümü (Fast Successive Mean Quantization Transform, FastSMQT) kullanılmıştır. Daha sonra, orijinal Seyrek Eleme Ağı (Sparse Network of Winnows, SNoW) sınıflandırıcısından esinlenilerek yeni bir SNoW yaklaşımı geliştirilmiştir. Geliştirilen yaklaşımın amacı, mevcut sınıflandırıcının güncellenmesi ile çalışma hızını artırmak olmuştur. Son olarak ise, FastSMQT ve güncellenmiş SNoW yöntemlerinden elde edilen çıktılar beraber analiz edilerek yakın kızılötesi görüntüde yüz tespiti işlemi yapılmıştır. Bu yaklaşımla yapılan yüz tespitinin, çok sayıda insan bulunan kalabalık ortamlarda ve kafa pozisyonlarının farklı olduğu durumlarda başarılı olabileceği öne sürülmüştür.

Gao vd. [8], yetersiz aydınlatma koşullarında görünür spektruma dayalı olarak insan yüzlerinin tespit edilmesi zorluğuna karşılık, yakın kızılötesi görüntüler için bir yüz tespiti yöntemi önermiştir. Önerilen yöntem, Performans Bozulma Farkı (Performance Degradation Difference, PDD) modeline dayalı olarak çalışan ve farklı aydınlatma koşullarına uyarlanabilir çok modlu bir görüntü birleştirme stratejisi önermiştir. Önerilen stratejideki PDD modeli, ışık yoğunluğunun algılama performansı üzerindeki etkisinin modellenmesiyle elde edilmiştir. Ayrıca, yetersiz aydınlatma koşullarında yüz tespiti performansını daha da artırmak için insan yüzünün merkez noktası tahminine yönelik bir yapay sinir ağı tanıtılmıştır. Merkez noktaya dayalı çalışan bu yöntemin, çapa kutusunun (anchor box) neden olduğu bir dizi sorunu önleyebilecek nitelikte olduğu öne sürülmektedir.

Literatürde renkli ve gri seviye görüntüler üzerinde yüz tespitine yönelik oldukça başarılı sonuçlar veren yöntemler bulunmaktadır. Ancak bu çalışmaların yakın kızılötesi görüntüler üzerinde yüz tespiti başarımının araştırılmasına yönelik bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada, literatürde yaygın olarak kullanılan Dlib [9], FaceBoxes [10], DSFD [6], BlazeFace [11], CenterFace [12], RetinaFace [13], SCRFD [14] ve YuNet [15] yüz tespiti yöntemlerinin yakın kızılötesi görüntüler üzerinde başarımlarının belirlenmesi amacıyla karşılaştırmalı analizleri yapılmıştır.

Son yıllarda yapılan çalışmalarda yüz tespiti yöntemlerinin başarımlarının artırılması için sınırlayıcı kutu belirleme yöntemleri önerilmektedir. Bu yöntemlerin amacı, farklı yüz tespiti modellerinin ürettiği sınırlayıcı kutu topluluklarını kullanarak verilen görüntüdeki yüzleri daha başarılı bir şekilde sınırlayan yeni sınırlayıcı kutuların üretilmesidir. Bu amaç doğrultusunda çalışan, Maksimum Olmayan Bastırma (Non-Maximum Suppression, NMS) [16], Ağırlıklı Kutular Birleşimi (Weighted Boxes Fusion, WBF) [17] ve Maksimum Olmayan Ağırlıklandırma (Non-Maximum Weighting, NMW) [18] yöntemleri literatürde kullanılan yöntemlerdendir. Bu çalışmada, bahsi geçen sınırlayıcı kutu belirleme yaklaşımlarının kızılötesi görüntülerde yüz tespitinde başarımları karşılaştırılarak performansları değerlendirilmiştir. Ayrıca, yine bu çalışmada; Kombinasyonel Oylama (KO) ve Maksimum

Olmayan Ortalama (Non-Maximum Averaging, NMA) olarak isimlendirilmiş iki yeni sınırlayıcı kutu belirleme yaklaşımı önerilmekte ve literatürdeki yöntemlerle karşılaştırılmaktadır.

Çalışma kapsamında yapılan deneylerde yakın kızılötesi görüntülerden oluşan TUFTS yüz görüntüsü veri seti [19, 20] kullanılmaktadır. Seçilen veri setinde verilen görüntülerde yüz konumları etiketlenmemiş olduğu için veri seti dâhilindeki tüm görüntüler yüz konumlarını gösterecek şekilde etiketlenerek referans değerler (ground truth) oluşturulmuştur. Elde edilen etiketli veriler hem yüz algılayıcılarının hem de sınırlayıcı kutu belirleme yöntemlerinin başarımlarının araştırılmasında kullanılmıştır.

Bu çalışmanın katkılarında birincisi; TUFTS veri seti içerisindeki bütün yakın kızılötesi görüntülerdeki yüz konumlarının sınırlayıcı kutular ile etiketlenmesidir. Çalışmanın katkılarında ikincisi; renkli veya gri seviye görüntülerde başarımları bilinen güncel yüz algılayıcılarının yakın kızılötesi görüntüler üzerindeki performanslarının karşılaştırmasıdır. Üçüncüsü; kullanılan yüz algılayıcılarının yakın kızılötesi görüntülerde bulmuş oldukları yüz konumlarını belirleyen sınırlayıcı kutuların iyileştirilmesi için literatürdeki güncel sınırlayıcı kutu belirleme yöntemlerinin başarımlarının karşılaştırılmasıdır. Yapılan çalışmanın son katkısı ise; Kombinasyonel Oylama (KO) ve Maksimum Olmayan Ortalama (Non-Maximum Averaging, NMA) adları verilen iki yeni sınırlayıcı kutu belirleme yönteminin önerilmesidir.

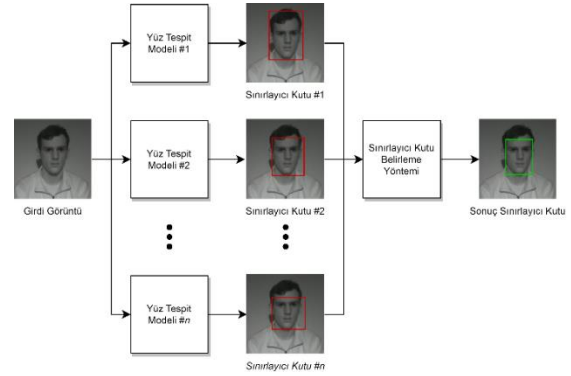
2 Materyal ve metot

Çalışmanın temel amacı olan kızılötesi görüntülerde yüz tespiti başarımlarının araştırılması ve yeni sınırlayıcı kutu belirleme yöntemleri ile bu başarımın artırılmasıdır. Ancak literatürde yüz konumlarının sınırlayıcı kutularla etiklendiği bir veri seti bulunmamaktadır. Bu sebeple; öncelikle TUFTS veri setindeki yakın kızılötesi görüntüler etiketlenmiştir. Kullanılan veri seti, farklı kafa pozisyonlarında alınmış görüntüleri de bünyesinde barındıran zengin bir içeriğe sahiptir. İlgili veri setine ilişkin detaylı bilgiler Bölüm 2.1.'de verilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmanın ana odağı olan yüz tespiti yöntemlerinin temeli nesne tespit yöntemlerine dayanmaktadır. Nesne tespit yöntemleri, son yirmi yılda devrim niteliğinde büyük bir ilerleme göstermiştir. Bu ilerlemenin derin öğrenme yöntemlerinin kullanılmasından kaynaklandığı bilinmektedir [21]. Bu sebeple; bu çalışmada derin sinir ağları ile yüz öğrenimini gerçekleştiren ve başarısı kanıtlanmış güncel yüz algılayıcılarından yedi tanesi seçilmiştir. Seçilen modellerden her birinin renkli veya gri seviye görüntüler içeren veri setleri kullanılarak performans analizlerinin yapıldığı çalışmalar mevcuttur [22, 23]. Ancak literatürde bu yöntemlerin yakın kızılötesi görüntüler üzerindeki performanslarının incelendiği bir çalışmaya rastlanamamıştır. Bu sebeple, benzeri çalışmalardan farklı olarak yakın kızılötesi görüntüler üzerinde yüz algılayıcılarının analizinin yapılması ve performanslarını artırıcı nitelikte yeni yaklaşımların önerilmesi amaç

edinilmiştir. Bölüm 2.2'de güncel yüz tespiti yöntemleri tanıtılmaktadır.

Literatürde birden fazla derin sinir ağı modelinin çıktılarını bir araya getirilerek daha başarılı ve kapsayıcı bir sonuç üretmeyi amaçlayan yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerden yola çıkarak geliştirilmiş sınırlayıcı kutu belirleme yöntemleri, birden fazla sınırlayıcı kutu tahminini bir araya getirip daha doğru ve daha güvenilir bir sınırlayıcı kutu elde etmeyi amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda çalışan dört farklı sınırlayıcı kutu belirleme yöntemi literatürden seçilmiştir. Ayrıca, yakın kızılötesi görüntülerde yüz tespiti yöntemlerinin başarımlarının artırılması amacıyla iki yeni sınırlayıcı kutu belirleme yaklaşımı önerilmektedir. Literatürden seçilen ve önerilen sınırlayıcı kutu belirleme yaklaşımları Bölüm 2.3'te verilmektedir. İlgili yöntemlerin çalışma yapısına Şekil 1'deki akış diyagramında yer verilmiştir. Şekilde görüleceği üzere; girdi görüntü her bir yüz tespit modeli tarafından analiz edilip ayrı ayrı yüz bölgeleri bulunmaktadır. Ardından, bütün yöntemlerin tespit etmiş oldukları sınırlayıcı kutu alanları, sınırlayıcı kutu belirleme yöntemine girdi olarak verilerek daha başarılı yüz konumları çıkarılmaktadır.



Şekil 1. Sınırlayıcı kutu belirleme yöntemi akış diyagramı

2.1 TUFTS yüz görüntüsü veri seti

TUFTS veri seti [19, 20], çeşitli görüntü türleri ile kapsamlı ve büyük ölçekli bir biçimde yüz görüntülerini bünyesinde barındıran bir veri setidir. Bu kapsamlı veri seti; görünür görüntüleri, yakın kızılötesi görüntüleri, termal görüntüleri, bilgisayarlı eskizleri, LYTRO görüntüleri, kaydedilmiş videoları ve 3D görüntüleri içermektedir.

Veri seti, 15'ten fazla ülkeden 74 kadın ve 38 erkek ile 10,000'den fazla görüntüden oluşmaktadır. 4 ila 70 yaş aralığını kapsayan kişilerden toplanan veriler, ortalama 15 dakikalık çekimler sonucunda elde edilmiştir.

Zengin içeriği ve bünyesinde barındığı yakın kızılötesi görüntüler sebebiyle seçilmiş olunan TUFTS veri seti, farklı kafa pozisyonlarında görüntülere sahiptir. İlgili veri seti 2266 adet yan ve 1140 adet düz kafa pozisyonunda olmak üzere toplam 3406 adet yakın kızılötesi yüz görüntüsü içermektedir. Şekil 2, TUFTS veri setinde bulunan bazı yakın kızılötesi görüntü örneklerini göstermektedir. Bu veri setindeki tüm görüntüler bu çalışma kapsamında etiketlenerek, referans sınırlayıcı kutu konumları elde edilmiştir.

İlgili veri setinde yakın kızılötesi görüntüleme için aydınlatma koşulu, 850nm dalga boyuna sahip kızılötesi 96 LED ışık sistemi kullanılarak sağlanmıştır. Kameralar, katılımcının etrafında yaklaşık bir yarım daire oluşturacak şekilde dokuz eşit mesafeli konuma getirilirken, her katılımcıdan sabit bir bakış açısına bakması istenerek görüntüler alınmıştır. Görüntü alınması esnasında her katılımcı, kameraya yakın mavi bir arka planın önünde oturulmuştur. Kameralar, tripodlara monte edilerek her kameranın yüksekliği, görüntü merkezine karşılık gelecek şekilde manuel olarak ayarlanmıştır. Katılımcıya olan mesafe, görüntü alımı sürecinde sabit tutulmuş ve dağınık ışıklar kullanılarak sabit bir aydınlatma koşulu sağlanması amaçlanmıştır [19].



Şekil 2. TUFTS yüz görüntüsü veri seti yakın kızılötesi örnek görüntüler [20]

TUFTS veri setini etiketleme işlemi, LabelImg aracı [24] kullanılarak yapılmıştır. Bu aşamada; veri seti içerisinde bulunan bütün yakın kızılötesi görüntülerdeki yüz bölgeleri, sınırlayıcı kutu içerisine alınacak şekilde işaretlenmiştir. İşaretlenen her bir görüntü *xml* formatında kaydedilmiştir. Bütün görüntülerin etiketlenmesi sonrasında, alınan veriler tek bir *csv* dosyası içerisinde toplanmıştır. Böylece, aynı formatta etiketlenmiş referans değerleri içeren tek bir dosya elde edilmiştir. Sonraki süreçte, önerilen ve karşılaştırılan tüm yöntemler aynı formatta etiketlenmiş veriler kullanılarak değerlendirilmiştir.

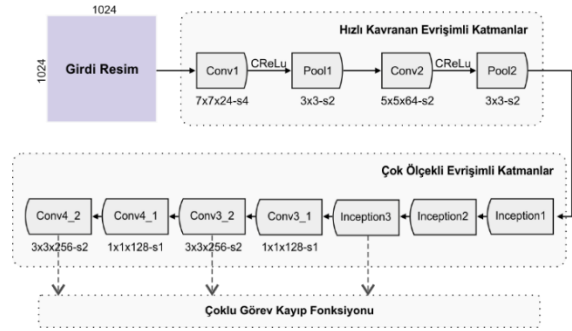
2.2 Yüz tespiti için derin sinir ağı modelleri

Derin sinir ağı modelleri, yüz tespiti için kullanılan etkili yöntemlerin başında gelmektedir. Bu modeller, yapay sinir ağlarını kullanarak yüzleri algılamak, konumlandırmak, tanımak ve sınıflandırmak gibi görevleri üstlenmektedirler.

Derin sinir ağı modelleri ile geliştirilmiş yüz tespiti yöntemleri, farklı prensiplere ve algoritmalara dayanarak yüz tespiti gerçekleştirmektedirler. Bu sebeple, bazıları daha hızlı çalışırken bazıları daha hassas veya daha yüksek doğruluk oranlarına sahip sonuçlar verebilmektedir. Bu bölümde literatürdeki güncel ve popüler yüz tespiti yöntemleri ve sınırlayıcı kutu belirleme yaklaşımları tanıtılmaktadır. Ayrıca iki yeni sınırlayıcı kutu belirleme yöntemi önerilmektedir.

2.2.1 FaceBoxes

FaceBoxes [10], yalnızca tek bir evrişimli sinir ağı içeren ve uçtan uca eğitilebilen bir yüz algılayıcısıdır. Bu yüz algılayıcısı; Şekil 3'te mimarisine yer verildiği üzere, Hızlı Kavranan Evrişimli Katmanlar (Rapidly Digested Convolutional Layers, RDCL) ve Çok Ölçekli Evrişimli Katmanlar (Multiple Scale Convolutional Layers, MSCL) olarak adlandırılmış katmanlardan oluşan bir ağ yapısına sahiptir. Ayrıca bu ağ yapısı, görüntü üzerinde aynı yoğunluğa sahip farklı tespit noktaları üretme stratejisini de benimsemektedir. Bu strateji, küçük boyutlu yüzlerin de tespit edilebilme oranını artırmaktadır.



Şekil 3. FaceBoxes mimarisi [10]

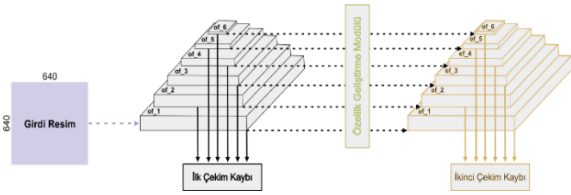
FaceBoxes, görüntü üzerinde farklı ölçeklendirmeler kullanarak farklı boyutlardaki yüz bölgelerini tespit etmeye çalışan kayan pencere (sliding window) yöntemini [25] kullanmaktadır. Bu sayede, farklı ölçeklerdeki çoklu yüzlerin aynı anda tespit edilmesi mümkün hale gelmektedir.

2.2.2 DSFD

Çift Çekim Yüz Algılayıcısı (Dual Shot Face Detector, DSFD) [6]; Tek Çekim Algılayıcısı (Single Shot Detector, SSD) [26] mimarisi üzerine üç yeni değişiklik önererek ortaya çıkan bir yüz algılayıcısıdır. Bu önerilerden ilki; sınıflandırmaların ve regresyonların yürütüldüğü öz nitelik haritalarının hesaplanması üzerine yapılmıştır. Yapılan çalışmada SSD ağından farklılaşan temel unsur, çeşitli derinliklerdeki altı öz nitelik haritasının altı "geliştirilmiş" öz nitelik haritasına dönüştürülmesidir. Önerilerden ikincisi; ağ mimarisinin eğitimi sırasında kayıp fonksiyonu çıktısını en aza indirmeyi hedefleyen bir kayıp fonksiyonunun geliştirilmesidir. Bu yaklaşımda; geleneksel nesne tespit kayıplarından farklı olarak, mimaride yalnızca farklı seviyeler için değil, aynı zamanda çekim olarak tanımlanmış iki farklı yapı için de aşamalı kayıp hesabı uygulanmaktadır. Çift Çekim Yüz Algılayıcısı ismi; bu çift akışlı tasarım sebebiyle verilmiştir. Yüz algılayıcısının getirdiği üçüncü öneri ise; gerçekleştirilen tahminlerin resim üzerindeki yüzler ile daha etkili bir şekilde eşleştirilmesini amaçlayan bir stratejidir. Bu stratejide, yüz tespiti sırasında yüz bölgesi alanının net bir şekilde belirlenememesi sorununa odaklanılmıştır.

DSFD; genişletilmiş VGG16 omurga ağını kullanmaktadır. Bu ağ yapısında, sınıflandırma katmanlarından önce bazı katmanlar kesilmiş ve yardımcı yapılar eklenerek ağ yapısı desteklenmiştir. İlgili yapıya

ilişkin mimari Şekil 4'te yer almaktadır. Ağ yapısı içerisinde, altı farklı evrişim katmanı, ilk çekim algılama katmanları olarak belirlenmiştir. Bu katmanlar, altı adet orijinal öz nitelik (of_1-of_6) haritasını oluşturmaktadır. Daha sonra, önerilmiş yapı içerisinde tek çekim algılayıcısını çift çekim algılayıcısına genişletmek için kullanılan Öz Nitelik Geliştirme Modülü (Feature Enhance Module, FEM) ile bu orijinal öz nitelik haritaları altı gelişmiş öz niteliğe (ef_1-ef_6) aktarılmaktadır. Bu öz nitelik haritaları, orijinal olanlarla aynı boyutlara sahiptir ve ikinci çekim algılama katmanlarını oluşturmak için SSD tarzı bir yaklaşımı benimsemişlerdir.

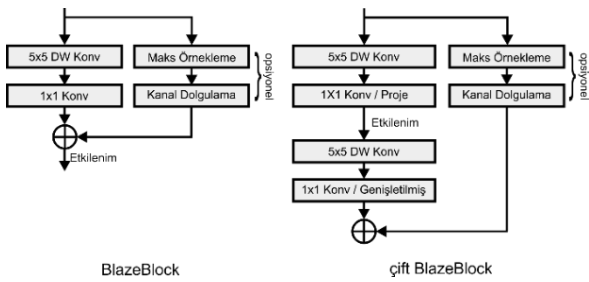


Şekil 4. DSFD mimarisini [6]

2.2.3 BlazeFace

BlazeFace [11], mobil GPU kullanımı için özel olarak tasarlanmış, hafif ve oldukça hızlı çalışan bir yüz algılayıcısıdır. BlazeFace geliştiricileri tarafından, bu modelin mobil cihazlar üzerinde 200-1000 FPS aralığında görüntü işleme kapasitesine sahip olduğu ifade edilmektedir. Bu sayede önerilen model, 2B/3B yüz anahtar noktası veya yüz bölgesi geometri tahmini, yüz özellikleri veya mimik sınıflandırması ve yüz bölgesi bölütlenmesi gibi yüz tespitinin oldukça önemli olduğu problemlerde kullanım alanı bulmaktadır.

Şekil 5'te görüldüğü gibi BlazeFace mimarisinde 5x5 boyutunda derin evrişim kullanılmaktadır. Bu yaklaşımın, tespit sürecini hızlandırmak için modeli daha sığ hale getirdiği düşünülmektedir.



Şekil 5. BlazeFace mimarisini [11]

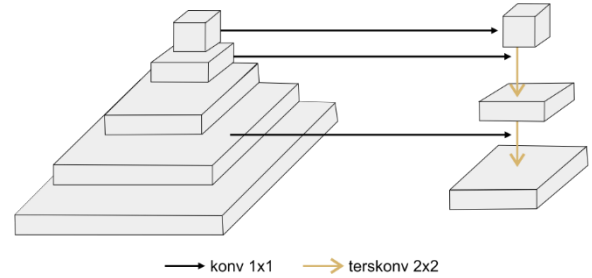
BlazeFace, NMS yöntemine [26, 27, 28] alternatif olarak geliştirilmiş stratejiye ve SSD [26] temel alınarak geliştirilmiş bir modele sahiptir.

2.2.4 CenterFace

CenterFace [12]; gerçek zamanlı hız ve yüksek doğruluk oranıyla, insan yüzü ve yüz karakteristik noktalarının (face landmarks) konumunu aynı anda tahmin etme yetisine sahip bir yüz algılayıcısıdır. Algılayıcının geliştirme sürecinde, özellikle hafif bir ağ yapısı ve daha basit bir yaklaşım

benimsenmiştir. Ağır modellere sahip yüz algılayıcılarının dezavantajlarının değerlendirildiği çalışmada, hafif ve basit yaklaşımla beraber ilgili algılayıcının güçlü ve etkili bir yüz tespiti ve hizalama sağlaması üzerinde durulmuştur. Yapılan çalışmalar neticesinde; ilgili yüz algılayıcısının geliştiricileri, semantik haritalar ile olası mevcut yüz bölgesinin öğrenilmesi ve sınırlayıcı kutunun yer alacağı yüz bölgesi ve bu yüz bölgesi üzerinde bulunacak potansiyel yüz işaretlerinin öğrenilmesi üzerine başarı sağlayan bir yöntem geliştirdiklerini öne sürmüşlerdir.

CenterFace mimarisine Şekil 6'da yer verilmiştir. Mimari içerisinde, omurga ağ olarak MobileNetV2 [29] ve boyun ağları olarak Öz Nitelik Piramidi Ağı (Feature Pyramid Network, FPN) [30] kullanılmıştır. Burada FPN; tek bir ölçek girdisinden tek bir öz nitelik piramidi oluşturmak için, yanıl bağlantılara sahip olan dikey bir mimari yapısına sahiptir. Mimari tasarımı doğrultusunda; yüz algılama ve hizalama için piramitteki yalnızca bir katman kullanılmıştır.

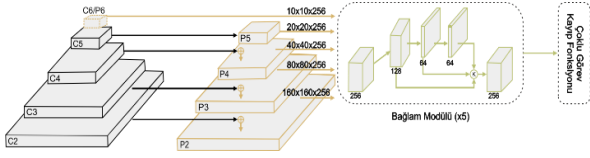


Şekil 6. CenterFace mimarisini [12]

2.2.5 RetinaFace

RetinaFace [13], farklı saha şartlarında verimli bir şekilde yüz bölgesi tespiti gerçekleştirmenin zorluğuna değinerek, bu soruna yönelik bir yüz algılayıcısı olarak geliştirilmiştir. Tespit edilen soruna çözüm için geliştirilen yüz algılayıcısı, ekstra denetimli (extra-supervised) ve öz denetimli (self-supervised) öğrenme tekniklerinin kullanıldığı çoklu görev (multi-task) öğrenimi üzerine kurgulanmıştır. Bu çerçevede, çeşitli yüz ölçeklerinde piksel tabanlı yüz bölgesi tespiti yapabilen güçlü bir yüz algılayıcısı oluşturulmuştur.

RetinaFace mimarisini Şekil 7'de verilmiştir. Mimari incelendiğinde, ilk olarak Öz Nitelik Piramidi Ağına (Feature Pyramid Network, FPN), ardından bağlam modülüne ve son olarak da çoklu görev kayıp fonksiyonuna sahip bir yapı görülmektedir. FPN, 2B görüntü üzerinden beş farklı seviyede öz nitelik çıkarmaktadır. Çıkarmış olduğu öz niteliklerden ilk dördü (C2-C5), önceden eğitilmiş ResNet modeli [31] kullanılarak hesaplanmaktadır. En üstte yer alan en küçük öz nitelik ise (C6), 2 piksellik adımlarla 3x3 boyutunda pencere ile evrişim işlemi uygulanarak çıkarılmaktadır. Elde edilen tüm bu öz nitelikler, daha fazla bağlamsal bilgiye erişebilmek için beş farklı filtreye sahip bağlam modülüne iletilmektedir. Son olarak ise, bu iletiler çoklu görev kayıp fonksiyonuna girdi olarak verilmektedir.



Şekil 7. RetinaFace mimarisi [13]

2.2.6 SCRFD

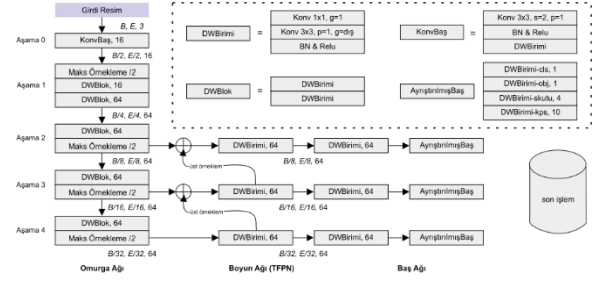
SCRFD [14], düşük çözünürlüklü görüntülerde küçük boyutlu yüzleri algılamanın zorluğuna dikkat çekerek bu soruna odaklanan bir yaklaşım önermiştir. Önerilen yaklaşımda, veri örnekleme (data sampling) ve hesaplama dağılımı (computation distribution) stratejilerinin verimli ve yüksek doğruluk oranlarına sahip yüz tespiti için oldukça önemli olduğu belirtilmiştir. Bu doğrultuda, iki farklı basit ama etkili yöntem tanıtılmıştır. Bunlardan ilki; kullanılacak veri setinin analizine dayanarak en çok ihtiyaç duyulan noktalarda eğitim örneklerini artıran Örnek Yeniden Dağıtım (Sample Redistribution, SR) stratejisidir. İkincisi ise; hesaplamayı modelin omurga ağı, boyun ağı ve baş ağı arasında yeniden paylaşımın Hesaplama Yeniden Dağıtım (Computation Redistribution, CR) stratejisidir. Önerilen SR ve CR stratejileri; birbirini tamamlar niteliktedir. Beraber kullanımlarının başarıyı pozitif yönde doğrudan etkileyeceği düşüncesi ile geliştirilmişlerdir.

Yüz tespiti gerçekleştirme aşamasında bir sınıflandırma ağının omurga ağını doğrudan kullanmak yetersiz olabilmektedir. Bu nedenle önerilen CR stratejisinde; farklı durumlar altında omurga ağı, boyun ağı ve baş ağı üzerindeki hesaplamayı yeniden tahsis etmek için ağ yapısı araması [32] kullanılmıştır. Bu arama metodu, ResNet'in [31] omurga ağı olduğu RetinaNet [30] üzerine uygulanmıştır. Boyun ağı olarak Yol Toplama Özelliği Piramit Ağı (Path Aggregation Feature Pyramid Network Network, PAFPN) [33] ve baş ağında 3x3 boyutunda evrişim katmanları kullanılmıştır.

2.2.7 YuNet

Model mimarilerinin ağır olması ve yüksek hesaplama maliyetleri, birçok yüz algılayıcısının mobil ve gömülü cihazlarda kullanılabilmesini zorlaştırmaktadır. Çünkü bu cihazlarda işlenebilecek model boyutu ve oluşacak gecikme süresini karşılayabilme yetisi oldukça kısıtlıdır. Bu durum göz önüne alınarak, hedef cihazlar için özel olarak tasarlanmış ve milisaniye düzeyinde çalışabilecek bir yüz algılayıcısı olan YuNet [15] geliştirilmiştir. YuNet; hafif, hızlı ve yüksek doğruluk oranına sahip bir yüz algılama modelidir. Oldukça hafif bir ağ yapısı üzerinden tasarlanan bu model, tespiti zor olan küçük boyutlu yüzlere odaklanmayı ve tespiti kolay olan büyük boyutlu yüzlerin hesaplama maliyetini olabildiğince azaltmayı ilke edinmiştir.

YuNet'in mimarisi Şekil 8'de verilmiştir. Bir omurga ağı, Küçük Öz Nitelikli Bir Piramit ağı (A Tiny Feature Pyramid Network, TFPN) bulduran boyun ağı ve bir baş ağı olmak üzere ilgili mimari üç bölüme ayrılmıştır.



Şekil 8. YuNet mimarisi [15]

2.3 Sınırlayıcı kutu belirleme yöntemleri

Nesne tespiti yöntemlerinin en sık kullandığı yaklaşımlardan biri bir sınırlayıcı kutu ile tespit edilen nesne konumunun belirlenmesidir. Sınırlayıcı kutular, bir nesnenin koordinatlarını (sol üst ve sağ alt köşelerin piksel konumları) temsil etmektedir. Ancak tek bir sınırlayıcı kutu tahmini, bazen yanıltıcı veya hatalı olabilmektedir. Buradan hareketle geliştirilen sınırlayıcı kutu belirleme yöntemleri, farklı model veya algoritmaların ürettiği sınırlayıcı kutuları kullanarak yeni bir sınırlayıcı kutu konumu belirlemektedir.

Sınırlayıcı kutu topluluğundan yeni bir sınırlayıcı kutu belirleme yöntemi (bounding box ensemble), birden fazla sınırlayıcı kutu tahminini bir araya getirip, onların birlikte analiz edilmesi ile daha başarılı ve daha güvenilir bir sınırlayıcı kutu elde etmeyi amaçlayan bir yöntemdir. Bu sayede, farklı yaklaşımların avantajları bir araya getirilerek; daha yüksek doğruluk oranına sahip, daha hassas ve daha güvenilir sonuçlar elde edilebilmektedir.

Bu çalışmada; literatürde mevcut olan Maksimum Olmayan Bastırma, Ağırlıklı Kutular Birleşimi ve Maksimum Olmayan Ağırlıklandırma yöntemleri kullanılarak, girdi olarak verilen sınırlayıcı kutuların iyileştirilmesi ve bu yöntemlerin performanslarının analiz edilmesi amaçlanmaktadır. Buna ilaveten; Kombinasyonel Oylama ve Maksimum Olmayan Ortalama olmak üzere iki adet yeni sınırlayıcı kutu belirleme yöntemi önerilmektedir.

2.3.1 Maksimum olmayan bastırma

Maksimum Olmayan Bastırma (Non-Maximum Suppression, NMS) [16], bir yüz/nesne algılayıcısı tarafından oluşturulmuş ve birbiri ile örtüşen sınırlayıcı kutuları indirgemek için kullanılan tekniktir. Yüz algılama, nesne takibi, görüntü ve videolarda nesne algılama gibi birçok alandaki farklı görevlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

NMS yönteminin arkasındaki temel fikir, en yüksek güven skoruna sahip sınırlayıcı kutuyu seçmektir. Bu seçim süreci, en yüksek skora sahip olan sınırlayıcı kutu ile kullanıcı tarafından belirlenen eşik değerinden daha yüksek oranda örtüşen diğer sınırlayıcı kutuları elemek suretiyle ilerletilmektedir. Bu işlem, tüm sınırlayıcı kutular için ayrı ayrı uygulanmaktadır. Böylelikle aynı nesneyi temsil etme potansiyeli olan sınırlayıcı kutular arasından en yüksek puana sahip olan dışındakiler elenmektedir.

Genellikle nesne algılayıcıları tarafından aynı nesne için çok sayıda sınırlayıcı kutu üretilmektedir. Bu durum; belirli nesnelere doğru olarak tespit edilmesini sağladığı gibi yanlış nesne tespitine de yol açmaktadır. NMS, yalnızca tespit edilen nesnelere karşılık gelen en ilgili sınırlayıcı

kutuları seçerek bu yanlış pozitifleri ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır. Yanlış veya gereksiz tespiti ortadan kaldıran bu yöntem, nesne tespit algoritmalarının hesaplama karmaşıklığını azaltmaya da yardımcı olmaktadır.

2.3.2 Ağırlıklı kutular birleşimi

Ağırlıklı Kutular Birleşimi (Weighted Boxes Fusion, WBF) [17], nesne algılama sistemlerinin performansını artırmak üzere tasarlanmış bir sınırlayıcı kutu belirleme yöntemidir. Bu yöntem, birden fazla sayıdaki sınırlayıcı kutunun sonuçlarını daha doğru ve daha kararlı tek bir sınırlayıcı kutuda birleştirerek sonuç üretmeye odaklı çalışmaktadır. Bu çalışma; güven skorlarına dayalı olarak sınırlayıcı kutu koordinatlarının ilgili modelin ağırlığı temel alınarak birleştirilmesini içermektedir. Buna göre her yöntemin ürettiği sınırlayıcı kutu için, ilgili yöntemin güven skoru ile orantılı olarak bir ağırlık değeri belirlenmektedir. Sonuç sınırlayıcı kutu konumu, belirlenen ağırlık değerleri göz önünde bulundurularak, sınırlayıcı kutuların koordinat değerlerinin ağırlıklı ortalaması alınarak hesaplanmaktadır. Daha yüksek güven skoruna sahip sınırlayıcı kutuya daha yüksek ağırlıklar atayarak; güven skoru yüksek tahminlerden daha fazla etkilenen, düşük güven skorlu veya hatalı tahminlerden ise daha az etkilenen sonuç birleştirilmiş sınırlayıcı kutu üretilmektedir.

WBF yönteminin amacı, farklı modellerin güçlü yanlarını birleştirerek daha güçlü bir sonuç elde etmektir. Ayrıca, yanlış tespit noktalarının veya aykırı değerlerin etkisini azaltılarak nesne algılama modellerinin performansı artırılmaktadır.

2.3.3 Maksimum olmayan ağırlıklandırma

Maksimum Olmayan Ağırlıklandırma (Non-Maximum Weighting, NMW) [18], nesne tespiti algoritmalarının doğruluğunu ve hassasiyetini artırmak için kullanılan bir sınırlayıcı kutu belirleme yöntemidir. Bu yöntem, birden fazla nesnenin bir görüntüde aynı bölgede bulunması durumunda doğru sınırlayıcı kutuların seçilmesine yardımcı olmaktadır. NMW, Maksimum Olmayan Bastırma (NMS) tekniğinden esinlenilerek geliştirilmiştir. NMS, gereksiz sınırlayıcı kutuları elemek ve yalnızca en güvenilir ve örtüşmeyen tahminleri tutmak için kullanılmaktadır. NMS yaklaşımında, en yüksek güven skoruna sahip sınırlayıcı kutu ile diğer her bir sınırlayıcı kutu IoU metriği kullanılarak karşılaştırılmaktadır. Ardından, belirlenen eşik değerin üzerinde örtüşmeye sahip sınırlayıcı kutu elimine edilmektedir. Bu durum, aynı nesne üzerinde yinelenen veya oldukça benzer konumlandırılan sınırlayıcı kutuları ortadan kaldırmaya yöneliktir. Bu yaklaşım, belirlenecek son sınırlayıcı kutunun iyileştirilmesini sağlamaktadır. NMW yönteminde ise; gerçekleştirilen eleme işlemi sırasında ek ağırlıklandırma faktörleri dâhil edilerek elde edilecek çıktı performansının yükseltilmesi hedeflenmektedir. Bu faktörler; hangi sınırlayıcı kutuların saklanacağını veya eleneceğini belirlerken, güven skorları, nesne boyutları veya diğer olası niteliklerin dikkate alınmasını içermektedir.

Literatürde yapılan çalışmalar [34], NMW yönteminin nesne tespiti ve nesne sınıflandırma alanında etkili olduğunu göstermektedir. Bu yöntem, çok sayıda nesnenin tespit edildiği durumlarda daha doğru sonuçlar elde etme

potansiyeline sahiptir. Bu yöntem ayrıca, nesne takibi, nesne tanıma ve diğer benzeri uygulamalarda da kullanılabilir. Bu yöntem ayrıca, nesne takibi, nesne tanıma ve diğer benzeri uygulamalarda da kullanılabilir.

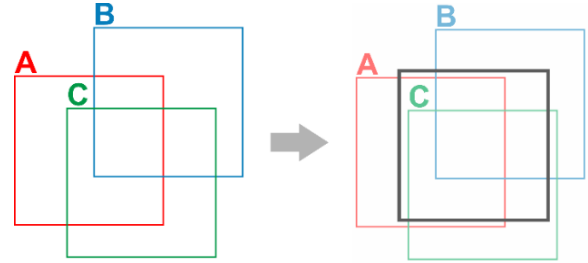
2.3.4 Ortalama alma

Sınırlayıcı kutu belirleme amacıyla kullanılacak en basit yaklaşım olan Ortalama Alma (OA), sınırlayıcı kutu koordinatlarının ortalamasının alınmasını benimseyen sınırlayıcı kutu belirleme yöntemidir. İlgili yöntem; bütün sınırlayıcı kutulara eşit mesafede yaklaşmakta olup herhangi bir ağırlıklandırma durumu söz konusu değildir. Bu yöntem; girdi olarak verilen her bir sınırlayıcı kutunun köşe koordinatlarının ayrı ayrı ortalamasını almaktadır. Şekil 9'da temsili çalışma şemasına yer verilen yöntemde, her bir sınırlayıcı kutu koordinatı için ilgili piksel değerinin toplam girdi olarak verilen sınırlayıcı kutu sayısına bölünmesi yolu ile ortalama alma işlemi uygulanmaktadır:

$$B_{sonuç,j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_{i,j}, \quad (1)$$

burada n , girdi olarak verilen sınırlayıcı kutu sayısını, $B_{i,j}$ i . sınırlayıcı kutunun j . köşesinin koordinatlarını ifade etmektedir.

Birbirine yakın konumlarda üretilmiş sınırlayıcı kutular üzerinde etkili sonuçlar veren yöntem; konumlandırılmaları birbirinden uzak veya bağımsız sınırlayıcı kutular üzerinde etkili çalışmamaktadır. Bu sebeple; yöntemin kullanımı öncesinde, Jaccard (IoU) metriği ile hedef sınırlayıcı kutuların ön analizi sonrası, keşişim oranı 0,8 ve üzeri olan durumlarda kullanımı tavsiye edilmektedir.



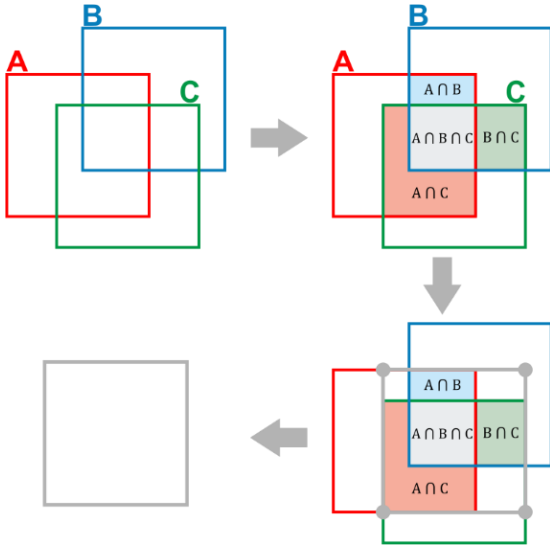
Şekil 9. Ortalama alma yöntemi çalışma şeması

2.3.5 Kombinasyonel oylama

Önerilen ilk sınırlayıcı kutu belirleme yöntemi olan Kombinasyonel Oylama (KO), sınırlayıcı kutu topluluğu kombinasyonlarının oylama yöntemi temel alınarak değerlendirilmesine odaklanmaktadır. Bu yöntem, farklı modellerinin tahminlerini bir araya getirerek en çok tercih edilen tahmini seçmeye dayanmaktadır.

Oylama işleminde karar yetkisi çoğunluğa aittir. Burada bahsedilen çoğunluk, mevcut katılımcı sayısının yarısından fazla oya sahip tarafı ifade etmektedir. Önerilen sınırlayıcı kutu belirleme yönteminde, bu çoğunluğun belirlenmesi sürecinde olası kombinasyonların analizine dayalı bir yaklaşım sergilenmektedir. Örneğin; Şekil 10'da görüldüğü gibi üç adet sınırlayıcı kutunun mevcut olduğu bir problemde, en az iki sınırlayıcı kutunun aynı alanda yüz bölgesi olduğunu tespit etmesi gerekmektedir. Yani, yüz

bölgesinin tespiti için ya kutulardan iki tanesinin ya da üç tanesinin seçim alanlarını barındıran bölgeler aranmaktadır. Bu arama sürecinde, Şekil 10'da görüleceği üzere A sınırlayıcı kutusu, B ile olduğu gibi C ile de ortak noktalara sahiptir. Bu durum, farklı kombinasyonlara bakılması gerektiğini göstermektedir. Bu sebeple; girdi olarak verilen sınırlayıcı kutuların sayısından başlanarak, sınırlayıcı kutu sayısının yarısına kadar olası bütün kombinasyonlar hesaplanmaktadır. Hesaplama neticesinde, elde edilen kombinasyonların içeriğindeki sınırlayıcı kutuların ortak olarak karşılık geldiği bölgeler kaydedilerek her birinin birleşimi alınıp sonuç sınırlayıcı kutu elde edilmektedir.



Şekil 10. Kombinasyonel oylama yöntemi çalışma şeması

Önerilen yöntemde, kombinasyona dayalı oylama işlemi yapılmadan önce iki defa eleme işlemi uygulanmaktadır. Bu işlemlerden ilki alakasız sınırlayıcı kutuları elimine etmek üzeredir. İlgili eleme işleminde, girdi olarak verilen her bir modele ait sınırlayıcı kutular birbiri ile ayrı ayrı IoU metriği baz alınarak karşılaştırılmaktadır:

$$IoU(B_i, B_j) = \frac{B_i \cap B_j}{B_i \cup B_j} \quad (2)$$

Karşılaştırma neticesinde elde edilen sonuç değer, belirlenen eşik değerden büyük ise bir listeye eklenmektedir. Bu çalışmada eşik değer 0,7 olarak seçilmiştir. Listeye eklenmiş olan sınırlayıcı kutular benzeri konumlarda yer alan sınırlayıcı kutular olup aykırı konumlardaki sınırlayıcı kutular elenmektedir.

Gerçekleştirilen ikinci eleme işlemi, oylama için karar verici sınırlayıcı kutuları belirlemek için yapılmaktadır. Yapılan bu işlemde, önceki eleme işleminde oluşturulan liste içerisindeki sınırlayıcı kutular kullanılmaktadır. Bu süreçte, öncelikle liste içerisindeki en büyük alana sahip sınırlayıcı kutu (B_{maks}) belirlenmektedir. Belirlenen bu sınırlayıcı kutu, liste içerisindeki diğer sınırlayıcı kutular ile IoU metriği ile analiz edilmektedir:

$$IoU(B_i, B_{maks}) = \frac{B_i \cap B_{maks}}{B_i \cup B_{maks}} \quad (3)$$

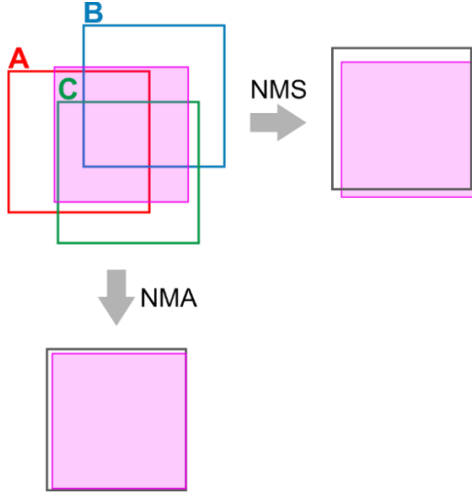
Analiz neticesinde bulunan değer, belirlenen eşik değerden küçük ise listeden kaldırılmaktadır. Bu çalışmada eşik değer 0,8 olarak belirlenmiştir. Bu sayede, farklı kombinasyonlar ile daha yüksek doğruluk oranına sahip sonuç sınırlayıcı kutunun üretildiği oylama yöntemine katkı sağlayan karar verici sınırlayıcı kutular belirlenmektedir.

Belirleme aşamasında gerçekleştirilen ilk eleme işlemi ile hedef nesne ile alakasız sınırlayıcı kutular göz ardı edilmektedir. Temel odak alanının net olarak belirlendiği bu süreçten sonra; o alana en çok hâkim olan, en geniş yer kaplayan sınırlayıcı kutu seçilerek onun etrafında diğer sınırlayıcı kutuların analizi ile ikinci bir eleme işlemi daha gerçekleştirilmektedir. Diğer başlıklarda verilen yöntemlerde, analizlerin gerçekleştirilmesi için en yüksek güven skorlarına sahip sınırlayıcı kutu seçilmektedir. Ancak, farklı modeller farklı güven skorları üretmektedir. Şekil 13 'te görüleceği üzere, modeller kendi içlerinde çok farklı güven skorlarına sahiptirler. Diğer taraftan, tespit noktası daha doğru olan bir modelin kendi güven skorunun daha düşük olduğu da görülebilmektedir. Bu sebeple, bu yanlıcı duruma çözüm önerisi getirmek için güven skorlarından bağımsız ve tarafsız bir yaklaşım önerilmektedir. İlgili yaklaşım, gelişmiş konumlandırma ve yüksek doğruluk oranlı yeni sınırlayıcı kutu üretme konusunda umut vericidir.

2.3.6 Maksimum olmayan ortalama

Geliştirilen ikinci yöntem olan Maksimum Olmayan Ortalama (Non-Maximum Averaging, NMA) yöntemi, Maksimum Olmayan Bastırma (NMS) ve Maksimum Olmayan Ağırlıklandırma (NMW) yöntemlerinden esinlenilerek geliştirilmiştir.

NMS, en yüksek güven skorlarına sahip sınırlayıcı kutuyu seçmek üzere kurgulanmış bir yöntemdir. Bu yöntem, en yüksek güven skorlarına sahip olan sınırlayıcı kutu ile diğer her bir sınırlayıcı kutunun IoU metriğine göre karşılaştırmasını yapmaktadır. Elde edilen sonuç değer, eşik değerden daha yüksek ise ilgili sınırlayıcı kutu bastırılmaktadır. Bu bastırma işlemleri neticesinde, son olarak en yüksek güven skoruna sahip sınırlayıcı kutu sonuç olarak çıkarılmaktadır. NMW ise; NMS yönteminin gerçekleştirdiği bastırma işlemi sırasında ek ağırlıklandırma faktörlerini kullanarak sonuç sınırlayıcı kutunun doğruluk oranını artırmak üzere geliştirilmiştir. Bu faktörler; hangi sınırlayıcı kutuların saklanacağını veya bastırılacağını belirlemede aktif rol oynamaktadır. Bu sayede, NMS yönteminin güven skorları üzerine türetilmiş olduğu yaklaşıma ağırlık faktörü eklenerek yeni bir yöntem öne sürülmüştür. Buradaki yaklaşımdan esinlenilerek maksimum olmayan ortalama yöntemi önerilmektedir. Önerilen yöntem, NMS yönteminin en yüksek güven skorlu sınırlayıcı kutuyu seçme stratejisini ortalama alma tekniğiyle ileriye taşımaktadır. İlâveten, NMW yönteminin ağırlık belirleme sırasındaki işlem süresinin de önüne geçerek daha basit ve etkili bir yaklaşım sunmaktadır. Sunulan yöntemin NMS yöntemi ile karşılaştırmalı tespit bölgeleri Şekil 11'deki şemada yer almaktadır.



Şekil 11. NMS ve NMA yöntemleri karşılaştırma şeması

Önerilen yöntem kapsamında, öncelikle NMS yönteminde olduğu gibi en yüksek güven skoruna sahip sınırlayıcı kutu (B_{maks}) belirlenmektedir. Belirlenen bu sınırlayıcı kutu, diğer tüm sınırlayıcı kutular ile IoU performans değerlendirme metriği kullanılarak karşılaştırılmaktadır:

$$I_i = IoU(B_i, B_{maks}), \quad (4)$$

burada I_i , i . sınırlayıcı kutu (B_i) ile en yüksek güven skoruna sahip sınırlayıcı kutunun (B_{maks}) IoU metrik değerini ifade etmektedir.

Ardından; karşılaştırma neticesinde elde edilen değer kullanılarak, ilgili sınırlayıcı kutunun koordinat değerleri üzerinde ortalama alma işlemi uygulanmaktadır. Sonuç sınırlayıcı kutu ($B_{sonuç}$) uygulanan bu ortalama yaklaşımı ile elde edilmektedir:

$$B_{sonuç} = \frac{\sum_{i=1}^n B_i I_i}{\sum_{i=1}^n I_i} \quad (5)$$

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Deney altyapısı

Bu çalışma kapsamında yapılan tüm deneyler, Intel Core i9 10850K 3,60 GHz 20MB önbelleğe sahip işlemciye, RTX 3060 12GB 192 bit NVIDIA ekran kartına ve 64 GB RAM belleğe sahip bilgisayar üzerinden gerçekleştirilmiştir.

3.2 Performans değerlendirme metrikleri

Performans değerlendirme metrikleri, bir modelin veya sistemin performansını ölçmek ve değerlendirmek için kullanılan ölçütlerdir. Bu çalışmada, Doğruluk (Accuracy), Kesinlik (Precision), Duyarlılık (Recall), F1 Skor (F1 Score) ve Jaccard (IoU) değerlendirme metrikleri kullanılmış olup her biri aşağıda açıklanmıştır:

1. Doğruluk: Toplam veri sayısının ne kadar doğru tespit edilebildiğini bulmaya odaklı bir metriktir. Doğru yapılan tahmin sayısının toplam tahmin (gerçek pozitif (TP), gerçek negatif (TN), yanlış

pozitif (FP), yanlış negatif (FN)) sayısına oranlanması ile hesaplanmaktadır:

$$\text{Doğruluk} = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (6)$$

2. Kesinlik: Gerçek pozitifler (TP) ile tüm pozitiflerin oranıdır:

$$\text{Kesinlik} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (7)$$

3. Duyarlılık: Gerçek pozitiflerin tüm doğru tespitlere oranını göstermektedir:

$$\text{Duyarlılık} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (8)$$

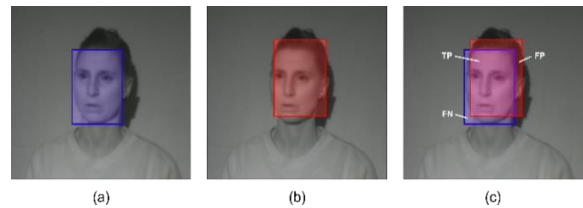
4. F1 Skor: Kesinlik ve Duyarlılık performans değerlendirme metriklerinin harmonik ortalamasının hesaplanması ile elde edilmektedir:

$$\text{F1 Skor} = \frac{2TP}{2TP + FP + FN} \quad (9)$$

5. Jaccard: İki kümenin benzerliğini ölçmek için kullanılan bir metriktir. Bu metrik, iki nesnenin (N_1, N_2) kesişim kümesinin, birleşim kümesine oranını hesaplamaktadır:

$$\text{Jaccard}(N_1, N_2) = \frac{N_1 \cap N_2}{N_1 \cup N_2} \quad (10)$$

Kullanılan performans değerlendirme metrikleri, referans değerler ile modeller tarafından tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması suretiyle çalışmaktadır. Bu çerçevede, Şekil 12 (a), referans değer ile oluşturulmuş gerçek yüz bölgesini, Şekil 12 (b), yüz tespit yöntemi tarafından tahmin edilen yüz bölgesini, Şekil 12 (c) ise (a) ve (b)'nin beraber değerlendirilmesi ile elde edilen TP, FN ve FP alanları ifade etmektedir.



Şekil 12. (a) gerçek yüz bölgesi, (b) tahmin edilen yüz bölgesi, (c) yapılan tahmin için TP, FN ve FP alanlar

3.3 Yüz Tespiti derin sinir ağı modellerinin yakın kızıl ötesi görüntüler üzerinde karşılaştırılması

Derin sinir ağı modelleri, büyük miktarda veriyi kullanarak karmaşık özellikleri öğrenme kabiliyetine sahiptirler. Bu kabiliyetlerinden dolayı, görüntülerdeki yüzleri tespit etmek ve tanımak için yaygın olarak kullanılırlar. Derin sinir ağı modelleri ile geliştirilmiş yüz algılayıcıları arasında performans ve hassasiyet farklılıkları olmaktadır. Belli bir senaryo üzerinde bir model iyi çalışırken, başka bir durumda diğer bir model daha yüksek başarı oranı ile yüz tespiti yapabilmektedir. Bu sebeple,

bölümde, literatürde eksikliği tespit edilmiş kızılötesi görüntüler üzerinde yüz tespiti senaryosunda, farklı yüz algılayıcılarının karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Literatürde yaygın olarak kullanılan popüler sekiz yüz tespiti yöntemi kızılötesi yüz görüntüleri içeren TUFTS veri seti içerisindeki, düz ve yan kafa pozisyonlarındaki görüntüler üzerinde çalıştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar; Doğruluk

(Accuracy), Kesinlik (Precision), Duyarlılık (Recall), F1 Skor ve Jaccard performans değerlendirme metrikleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Düz kafa pozisyonundaki resimlerden elde edilen sonuç değerleri **Tablo 1**'de, yan kafa pozisyonundaki sonuç değerleri **Tablo 2**'de ve tamamının beraber ele alındığı değerler ise **Tablo 3**'te yer almaktadır.

Tablo 1. Yüz algılayıcılarının düz kafa pozisyonunda karşılaştırılması

Yüz Algılayıcı	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F1 Skor	Jaccard
BlazeFace	0.7594	0.7568	0.8734	0.8050	0.6792
CenterFace	0.8886	0.8872	0.9206	0.8979	0.8193
Dlib (HOG)	0.7989	0.8697	0.8017	0.8293	0.7140
DSFD	0.9342	0.9241	0.9537	0.9376	0.8863
FaceBoxes	0.8759	0.8591	0.9208	0.8851	0.8115
RetinaFace	0.9238	0.9096	0.9500	0.9283	0.8699
RetinaFace_MobileNet	0.8921	0.8794	0.9245	0.8990	0.8326
SCRFD	0.9367	0.9215	0.9609	0.9400	0.8897
YuNet	0.5283	0.8871	0.4661	0.6071	0.4632

Tablo 2. Yüz algılayıcılarının yan kafa pozisyonunda karşılaştırılması

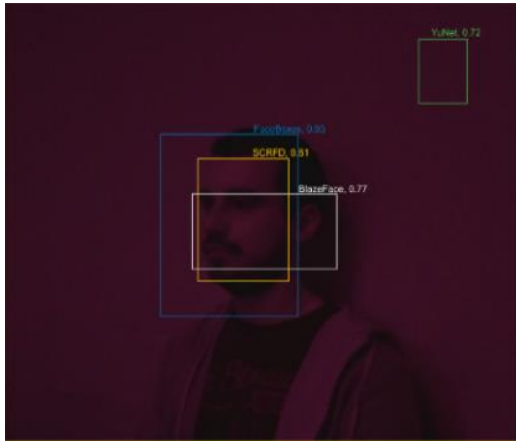
Yüz Algılayıcı	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F1 Skor	Jaccard
BlazeFace	0.5913	0.6126	0.8435	0.6979	0.5550
CenterFace	0.8495	0.8205	0.9366	0.8658	0.7690
Dlib (HOG)	0.5417	0.6038	0.5984	0.5969	0.4858
DSFD	0.9162	0.9183	0.9313	0.9224	0.8589
FaceBoxes	0.8206	0.7861	0.9244	0.8417	0.7436
RetinaFace	0.9202	0.9237	0.9335	0.9258	0.8647
RetinaFace_MobileNet	0.6430	0.6939	0.7575	0.7199	0.6198
SCRFD	0.9269	0.9154	0.9525	0.9316	0.8748
YuNet	0.3666	0.5670	0.3425	0.4217	0.3290

Tablo 3. Yüz algılayıcılarının bütün görüntüler üzerinde karşılaştırılması

Yüz Algılayıcı	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F1 Skor	Jaccard
BlazeFace	0.6162	0.6217	0.8854	0.7164	0.5757
CenterFace	0.8626	0.8428	0.9312	0.8766	0.7858
Dlib (HOG)	0.5041	0.5915	0.6195	0.5973	0.4875
DSFD	0.9223	0.9202	0.9388	0.9275	0.8681
FaceBoxes	0.8391	0.8105	0.9232	0.8562	0.7663
RetinaFace	0.9214	0.9190	0.9390	0.9266	0.8664
RetinaFace_MobileNet	0.6599	0.6937	0.8017	0.7370	0.6376
SCRFD	0.9302	0.9174	0.9553	0.9344	0.8798
YuNet	0.4207	0.6741	0.3838	0.4837	0.3739

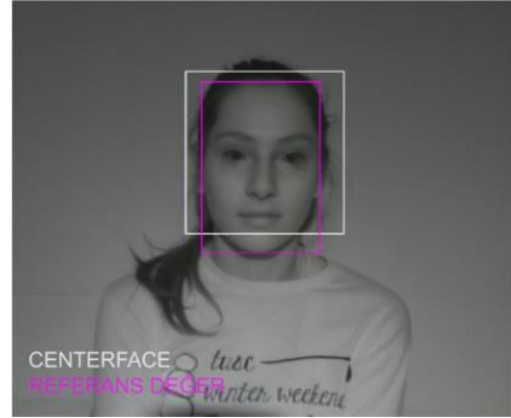
Tablolar incelendiğinde, yan kafa pozisyonlarında gerçekleştirilen yüz tespiti işlemlerindeki başarının düz kafa pozisyonuna göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, yüz algılayıcılarının bütün görüntüler üzerindeki başarısını da doğrudan etkileyerek farklı kafa pozisyonlarına karşı tutarlılıklarını ortaya koymaktadır. Örneğin; MobileNet kullanılarak eğitimi gerçekleştirilmiş RetinaFace yüz algılayıcısı; düz kafa pozisyonlarında %89 doğruluk oranına sahipken, yan kafa pozisyonlarında bu oran %64'e düşmektedir. Aradaki bu büyük fark, ilgili yüz algılayıcısının yakın kızılötesi görüntülerde tutarlı çalışmadığını göstermektedir. Diğer taraftan, seçilen modeller içerisinde en yüksek doğruluk oranlarına sahip olan SCRFD yüz algılayıcısı, düz kafa pozisyonunda %93, yan kafa pozisyonunda ise %92 doğruluk oranı ile yüz tespiti yapmıştır. İlgili yüz algılayıcı, hem farklı kafa pozisyonlarında verdiği yüksek istikrarlı sonuçlar hem de sağlamış olduğu yüksek doğruluk oranları sebebiyle yakın kızılötesi görüntüler üzerinde çalışabilecek başarılı ve tutarlı bir yüz algılayıcı olmuştur. Seçilen modeller arasındaki en güncel yüz algılayıcısı olan YuNet ise, en düşük doğruluk oranlarına sahip olmuş ve yakın kızılötesi görüntüler üzerinde yeterli tespit başarısı gösterememiştir.

Literatürde yer alan her yüz algılayıcısının başarı değerlendirme kriterleri ve kullandığı referans değerler birbirinden farklıdır. Bu durum, yüz algılayıcılarının ürettiği güven skorlarının yer aldığı Şekil 13'te daha iyi görülebilmektedir. Burada; %93 ile en yüksek güven skoru üreten FaceBoxes, yüz bölgesi dışında boyun bölgesini ve diğer alakasız bölgeleri de yüz alanı olarak tespit ederken, doğru yüz bölgesine en yakın konumlandırmayı yapan SCRFD, %81 oranında güven skoru üretmiştir. Diğer taraftan; yanlış bir yüz bölgesi tespiti yapan BlazeFace %77, yüz bölgesi ile alakası olmayan bir alanı seçen YuNet ise 72 oranında güven skoruna sahiptir. Dolayısıyla, yüz algılayıcılarının ürettiği güven skorları tutarlılık göstermemektedir. Bu sebeple, gerçekleştirilen çalışmalar kapsamında elde edilen doğruluk oranları, etiketleme ile oluşturulmuş referans değerler temel alınarak çıkarılmış ve bu sıkıntılı durumun önüne geçilmiştir.



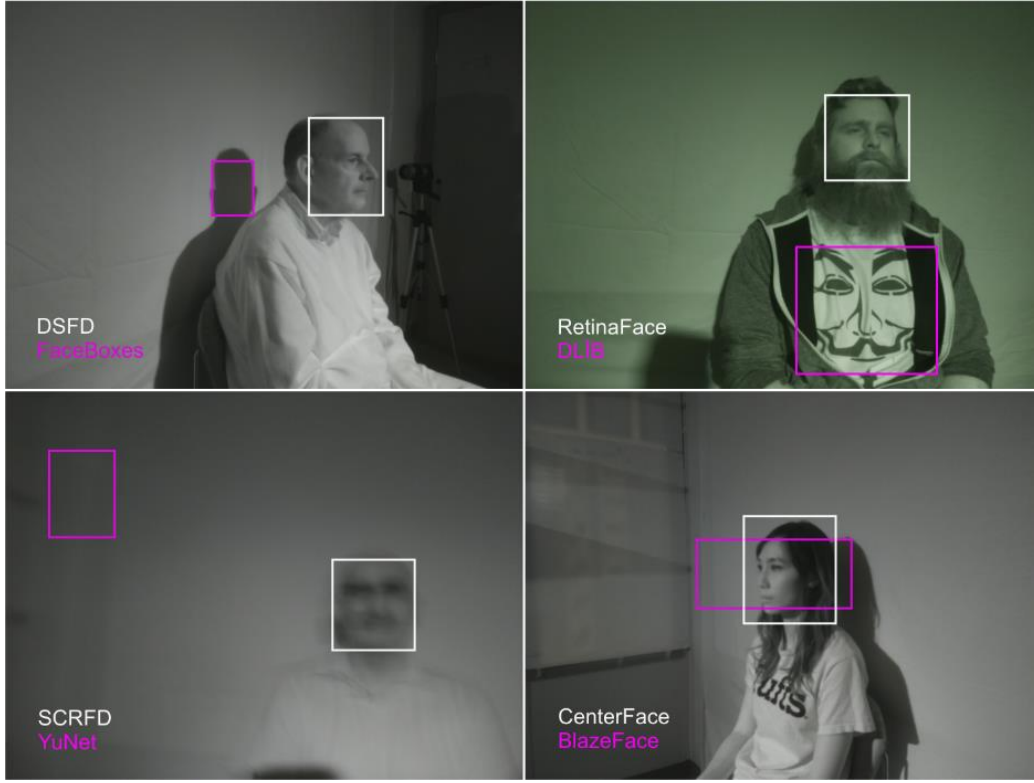
Şekil 13. Yüz algılayıcıları tarafından bulunan yüz bölgeleri ve ürettikleri güven skorları

Yüz tespiti sonrası örnek bir sonuç görüntüsüne Şekil 14'te yer verilmiştir. Burada, etiketleme işlemi sonrasında üretilen referans değer ve CenterFace yüz algılayıcısı tarafından tespit edilen yüz bölgeleri görülmektedir. İlgili şekilde görüleceği üzere, referans değer tam yüz bölgesini çerçevelemektedirken, CenterFace yüz alanının bazı bölgelerini tam alamamakta ve enlemesine daha geniş olarak bulmaktadır. Bu durum tespit edilemeyen noktalar üzerinde yapılacak çalışmaları başarısız, diğer alanlarda gerçekleştirilecek işlemleri ise daha maliyetli yapacak niteliktedir. Bu sebeple, yüz bölgesinin net olarak tayin edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, renkli ve gri seviye görüntülerde başarılı sonuçlar veren yüz algılayıcılarının yakın kızılötesi görüntüler üzerindeki performansları analiz edilerek, yetersiz aydınlatma durumlarında yüz tespiti işleminin yapılmasının elzem olduğu durumlarda işlem maliyetini düşürecek ve yüz tespiti sonrasında gerçekleştirilecek işlemlerin başarısını artıracak bir yaklaşım sergilenmektedir.



Şekil 14. Referans değer ve CenterFace tarafından çıkarılan yüz bölgeleri

Bazı yüz algılayıcıları tarafından tespit edilen yüz bölgelerinin karşılaştırmalı ele alındığı görsellere Şekil 15'te yer verilmiştir. Görsellerde görüleceği üzere, bazı modeller yüz alanının dışındaki farklı konumları da yüz bölgesi olarak tanıyabilmekte veya mevcut yüz alanının belli kısımlarını tespit edememektedir. Tablo 1-3'te verilen tespit başarı oranlarını direkt etkileyen bu durum, yüz tespiti sonrası gerçekleştirilebilecek yüz tanıma, kafa pozisyon tahmini, duygu analizi, yüz bölgesindeki göz, burun, ağız vb. uzuvların tespiti gibi problemlere getirilen çözüm yaklaşımlarını da doğrudan etkilemektedir. Buna dayanarak, tişörtteki yüz figürünün veya duvara yansıyan gölgenin yüz bölgesi olarak algılanması, sonraki aşamalarda üzerine çalışılacak bu gibi tespitleri zora sokacak niteliktedir. Bu sebeple, yüz algılayıcılarının karşılaştırmalı analizi kafa pozisyonlarına da bakılarak ayrı ayrı yapılmıştır. Değerlendirme sonuçları ve örnek görseller beraber incelendiğinde, bulanık bir görüntüde dahi yüz bölgesini doğru tespit eden SCRFD yüz algılayıcısının en yüksek doğruluk oranlarına, YuNet yüz algılayıcısının ise en düşük doğruluk oranlarına sahip olması durumu anlaşılmaktadır.



Şekil 15. Farklı yüz algılayıcıları tarafından tespit edilen yüz bölgeleri

3.4 Sınırlayıcı kutu belirleme yöntemlerinin yakın kızıl ötesi görüntüler üzerinde karşılaştırılması

Sınırlayıcı kutu belirleme yöntemleri (bounding box ensemble), nesne tespitinde elde edilen sınırlayıcı kutunun doğruluğunu ve hassasiyetini geliştirmek için birden fazla modeli veya algoritmayı birleştiren teknikleri ifade etmektedir. Bu yöntemler, farklı modellerin güçlü yönlerinden yararlanarak daha doğru sınırlayıcı kutu tahminleri üretmeyi amaçlamaktadır. Bu bölümde, bu amaç doğrultusunda geliştirilmiş NMS, NMW ve WBF sınırlayıcı kutu belirleme yöntemleri, basit olarak kullanılabilir OA yöntemi ve bu çalışma kapsamında önerilen NMA ve KO yöntemleri karşılaştırılmaktadır. Yapılan analizler kapsamında; performans değerlendirme metriği olarak Doğruluk, Kesinlik, Duyarlılık, F1 Skor ve Jaccard kullanılmıştır.

Bu bölümde yapılan analizlerde Bölüm 3.2.'de yapılan deneylerde en iyi sonucu veren yüz tespiti derin sinir ağı modelleri kullanılmıştır. Bu bağlamda en iyi sonucu veren modeller beşli, dördü, üçlü ve ikili olacak şekilde gruplandırılarak ürettikleri sınırlayıcı kutular birleştirilmiştir. Bu sayede, mevcut ve önerilen yöntemlerin kullanılan model sayısına hassasiyeti ve performans oranlarındaki değişimi analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmaya ilişkin sonuç değerler Tablo 4-7'de yer almaktadır.

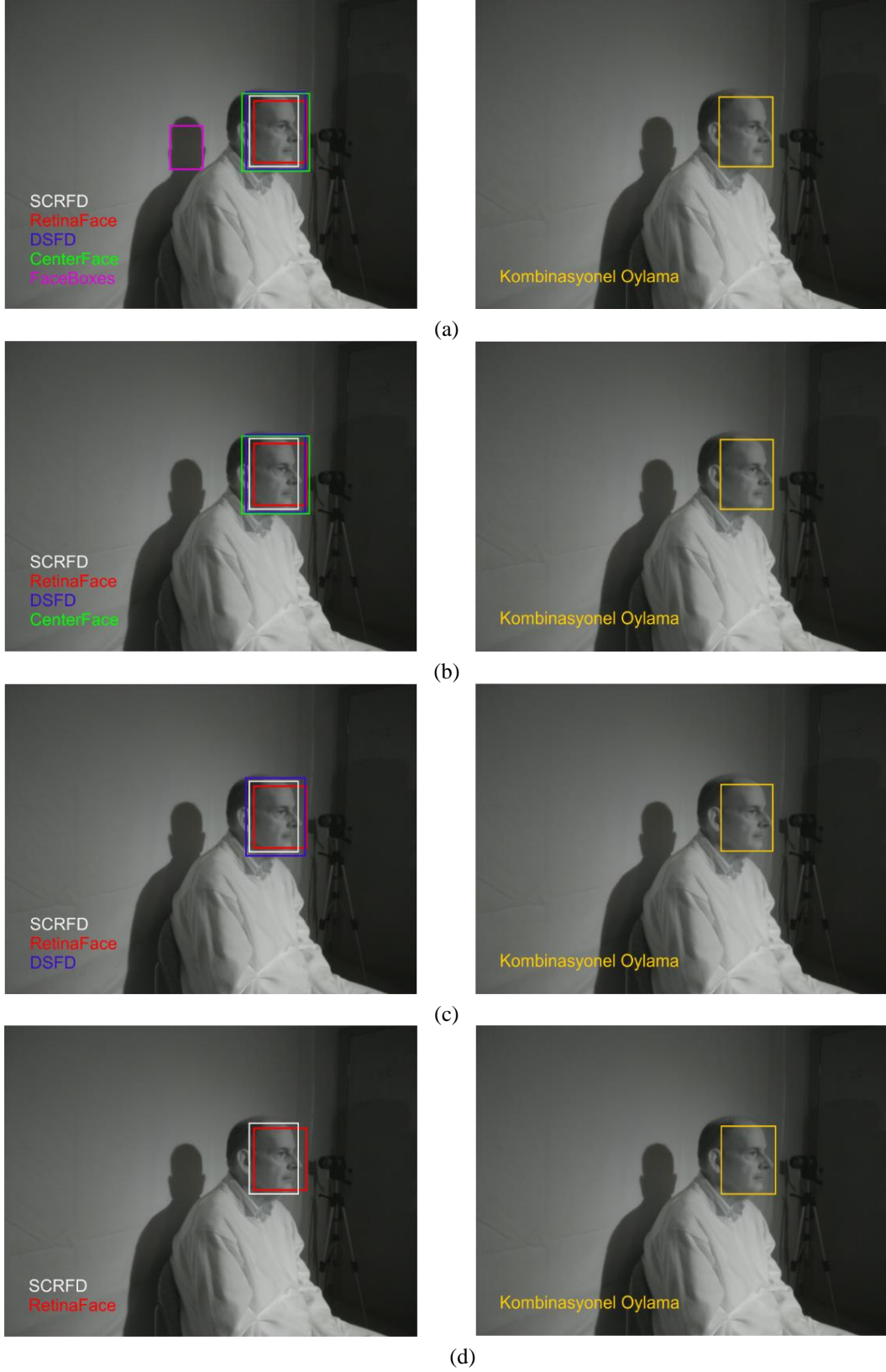
Sayısal sonuçlar incelendiğinde; en iyi beş modelin (Tablo 4) kullanıldığı senaryoda; önerilen KO yöntemi Kesinlik haricindeki bütün performans değerlendirme

metriklerinde en başarılı sonucu üretmiştir. En iyi dört modelin (Tablo 5) kullanıldığı senaryoda, Doğruluk ve Duyarlılık metriklerinde, en iyi üç modelin (Tablo 6) kullanımında Doğruluk ve Jaccard metriklerinde, en iyi iki modelin (Tablo 7) yer aldığı senaryoda ise Duyarlılık ve F1 Skor performans değerlendirme metriklerinde KO yöntemi daha başarılı olmuştur.

Önerilen KO yöntemi, mevcut sınırlayıcı kutu belirleme yöntemlerinden daha başarılı olduğu gibi değerlendirmeye alınan tüm yüz tespiti modellerinden de daha başarılı sonuçlar üretmiştir. Tablo 3 ve Tablo 4 beraber incelendiğinde; KO dışındaki sınırlayıcı kutu belirleme yöntemlerinin sadece Kesinlik ve Duyarlılık performans değerlendirme metriklerinde SCRFD'den daha başarılı olduğu, KO yönteminin ise bütün metriklerde girdi olarak verilen modellerden daha başarılı sonuçlar ürettiği görülmektedir. İlgili yöntemin farklı senaryolarda ürettiği sonuç sınırlayıcı kutular Şekil 16'da yer alan görsellerde her bir girdi durumu için ayrı ayrı verilmiştir. Örneğin Şekil 16 (a) incelendiğinde görüleceği üzere verilen girdi görüntü için FaceBoxes modeli yanlış yüz tespiti yapmakta, CenterFace ise olması gereken yüz bölgesinden daha geniş bir alanı işaretlemektedir. Ayrıca diğer modellerden daha başarılı sonuçlar üretmesine rağmen SCRFD modelinin çıktısı olan sınırlayıcı kutuda kişinin burun bölgesini tam olarak alınmamaktadır. Diğer taraftan, KO yönteminin beş farklı modelin ürettiği sınırlayıcı kutuları kullanarak tüm modellerden daha başarılı bir sınırlayıcı kutu ürettiği görülmektedir.

Karşılaştırmalar neticesinde; sınırlayıcı kutu belirleme yöntemlerinin birçoğunun mevcut yüz algılayıcılarının başarısından daha yüksek sonuçlar ürettiği görülmektedir.

Bu durum sınırlayıcı kutu belirleme yöntemlerinin mevcut yüz veya nesne algılayıcılarının tespit doğruluğunu artırıcı nitelikte olduğunu kanıtlamaktadır.



Şekil 16. En iyi sonucu veren beş (a), dört (b), üç (c) ve iki (d) modelin kullanımı ile kombinasyonel oylama yönteminden yeni sınırlayıcı kutu üretilmesi

Tablo 4. En iyi sonucu veren beş modelin (SCRFD, RetinaFace, DSFD, CenterFace, FaceBoxes) girdi olarak verildiği durumda sınırlayıcı kutu belirleme yöntemlerinin karşılaştırılması

Sınırlayıcı Kutu Belirleme Yöntemi	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F1 Skor	Jaccard
NMS	0.9232	0.9219	0.9389	0.9284	0.8694
NMW	0.9241	0.9068	0.9557	0.9288	0.8702
WBF	0.9221	0.9027	0.9567	0.9270	0.8671
NMA	0.9243	0.9019	0.9564	0.9268	0.8586
OA	0.9041	0.8827	0.9447	0.9105	0.8490
KO	0.9326	0.9205	0.9591	0.9374	0.8801

Tablo 5. En iyi sonucu veren dört modelin (SCRFD, RetinaFace, DSFD, CenterFace) girdi olarak verildiği durumda sınırlayıcı kutu belirleme yöntemlerinin karşılaştırılması

Sınırlayıcı Kutu Belirleme Yöntemi	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F1 Skor	Jaccard
NMS	0.9231	0.9218	0.9389	0.9283	0.8692
NMW	0.9278	0.9162	0.9525	0.9323	0.8761
WBF	0.9271	0.9140	0.9539	0.9315	0.8748
NMA	0.9159	0.8989	0.9501	0.9216	0.8582
OA	0.9250	0.9126	0.9602	0.9357	0.8771
KO	0.9337	0.9066	0.9689	0.9348	0.8749

Tablo 6. En iyi sonucu veren üç modelin (SCRFD, RetinaFace, DSFD) girdi olarak verildiği durumda sınırlayıcı kutu belirleme yöntemlerinin karşılaştırılması

Sınırlayıcı Kutu Belirleme Yöntemi	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F1 Skor	Jaccard
NMS	0.9231	0.9218	0.9389	0.9283	0.8692
NMW	0.9264	0.9205	0.9453	0.9310	0.8738
WBF	0.9271	0.9204	0.9454	0.9310	0.8748
NMA	0.9283	0.9304	0.9402	0.9283	0.8694
OA	0.9268	0.9203	0.9461	0.9364	0.8746
KO	0.9366	0.9280	0.9455	0.9353	0.8819

Tablo 7. En iyi sonucu veren iki modelin (SCRFD, RetinaFace) girdi olarak verildiği durumda sınırlayıcı kutu belirleme yöntemlerinin karşılaştırılması

Sınırlayıcı Kutu Belirleme Yöntemi	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F1 Skor	Jaccard
NMS	0.9216	0.9188	0.9396	0.9268	0.8666
NMW	0.9266	0.9192	0.9475	0.9312	0.8742
WBF	0.9268	0.9192	0.9478	0.9314	0.8745
NMA	0.9273	0.9239	0.9390	0.9266	0.8664
OA	0.9345	0.9123	0.9557	0.9374	0.8817
KO	0.9327	0.9104	0.9701	0.9376	0.8774

3.5 Yüz tespiti derin sinir ağı modellerinin işlem zamanlarının karşılaştırılması

Modellerin işlem zamanlarının karşılaştırılması, farklı modellerin aynı işlemi gerçekleştirmek için tükettiği süreleri ve performanslarını değerlendirmek amacıyla yapılmıştır. Yapılan çalışma hem CPU hem de GPU üzerinde yürütülerek, Tablo 8'de görüleceği üzere ayrı ayrı analiz sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; CPU üzerinde 0,011 saniyelik çalışma süresi ile BlazeFace, GPU üzerinde ise 0,004 saniyelik çalışma süresi ile FaceBoxes en hızlı model olmuştur. Diğer taraftan; 3 saniyenin üzerinde işlem zamanı gerektiren Dlib, CPU üzerinde en yavaş çalışan model olurken, RetinaFace 0,8 saniye işlem zamanı ile GPU üzerinde en yavaş çalışan model olmuştur.

Gerçekleştirilen değerlendirme sürecinde; işlem zamanı karşılaştırması ile, ilgili modellerin kullandığı omurga ağı, sahip olduğu parametre sayısı ve kayan nokta operasyonu (Floating Point Operations, FLOP) miktarları da göz önüne alınmıştır. Bahsedilen çalışmaya ilişkin karşılaştırma verileri Tablo 9'da yer almaktadır. Sonuç olarak; Tablo 8 ve Tablo 9 beraber incelendiğinde, modellerin sahip oldukları parametre sayıları ve FLOP miktarları ile işlem zamanları arasında ilişki olduğu görülmektedir.

Tablo 8. İşlem zamanı karşılaştırma tablosu

Yüz Algılayıcı	İşlem Zamanı(sn)	
	CPU	GPU
Blazeface	0.011	0.006
CenterFace	0.460	0.170
Dlib (HOG)	3.010	-
DSFD	2.300	0.260
FaceBoxes	0.100	0.004
RetinaFace	1.800	0.800
RetinaFace_MobileNet	0.430	0.058
SCRFD	0.055	0.047
YuNet	0.410	-

Tablo 9. Modellere ait omurga ağı, parametre ve FLOP karşılaştırma tablosu

Yüz Algılayıcı	Omurga Ağı	Param (M)	FLOP (G)
BlazeFace	BlazeNet*	0.12	0.71
CenterFace	MobileNetV2	3.48	0.88
DSFD	ResNet152	120.06	259.55
FaceBoxes	FaceNet**	1.01	0.27
RetinaFace	ResNet50	29.50	37.59
RetinaFace	MobileNet0,25	0.46	0.80
SCRFD	Basic Res	0.82	2.50
YuNet	MobileNet	0.75	1.49

* BlazeNet → iyileştirilmiş MobileNet

** FaceNet → RDCL ve MSCL

4 Sonuçlar

Yetersiz ışık altında verimli bir şekilde yüz tespiti yapılabilmesi için yakın kızılötesi görüntülerden yararlanılabilmektedir. Bu çalışmada literatürde yaygın olarak kullanılan yüz tespiti yöntemleri yakın kızılötesi görüntüler üzerinde karşılaştırılmıştır. Yürütülen çalışmada; literatürde etiketli yakın kızılötesi yüz görüntülerinden

oluşan bir veri seti bulunmaması sebebiyle TUFTS yüz görüntüsü veri seti etiketlenerek, yakın kızılötesi görüntüler üzerinde yüz tespitleri yapılabilmesi için referans değerler oluşturulmuştur. Elde edilen referans değerlerin ve beş farklı performans değerlendirme metriğinin kullanılması ile dokuz farklı yüz algılayıcısının yakın kızılötesi görüntüler üzerinde karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Analiz kapsamında; düz kafa pozisyonu, yan kafa pozisyonu ve bütün kafa pozisyonları olmak üzere ilgili veriler ayrı ayrı ele alınmıştır. Bu sayede, yüz algılayıcıların yakın kızılötesi görüntülerde istikrarlı çalışma durumları ve tutarlılıkları ortaya çıkarılmıştır. Bunlara ilaveten, ilgili yüz algılayıcıların farklı donanım bileşenleri üzerinde işlem zamanı karşılaştırmaları yapılarak performansları değerlendirilmiştir.

Ayrıca, yüz tespiti modellerinin başarımlarını artırmak için iki yeni sınırlayıcı kutu belirleme yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemler yüz tespiti modellerinin ürettiği sınırlayıcı kutu topluluklarını kullanarak daha başarılı yeni bir sınırlayıcı kutu üretmektedir. Bu doğrultuda, önerilen sınırlayıcı kutu belirleme yöntemleri literatürde kullanılan dört sınırlayıcı kutu belirleme yöntemi ile karşılaştırılmıştır.

Yüz algılayıcıların farklı kafa pozisyonlarında incelendiği çalışmada, düz kafa pozisyonunda yapılan yüz tespiti işlemlerinin daha başarılı performans verdiği ve yan kafa pozisyonlarında bu başarının azaldığı görülmüştür. Bu durum, genel sonuca bakıldığında kafa pozisyonundan daha az etkilenen yüz algılayıcılarının daha yüksek başarıya sahip olması ile örtüşmektedir. Bütün kafa pozisyonlarında %93 ile en yüksek doğrulukta tespit yapan SCRFD, yakın kızılötesi görüntüler üzerinde en başarılı yüz tespiti işlemi gerçekleştiren model olmuştur. Seçilen modeller arasında en güncel yüz algılayıcısı olan YuNet ise, bütün kafa pozisyonlarında %42 doğruluk oranı ile en düşük başarıyı gösteren yüz tespiti yöntemi konumundadır. Diğer taraftan, Retina_MobileNet, BlazeFace ve Dlib düz kafa pozisyonunda sırasıyla; %89, %75 ve %79 doğruluk oranlarıyla daha başarılı sonuçlar üretirken, yan kafa pozisyonunda elde ettikleri %64, %59 ve %54 doğruluk değerleri ile yeterli başarıyı sağlayamamıştır. Bu yüz algılayıcıları tutarlı sonuçlar üretmek konusunda başarılı olamamış ve istikrarı sağlayamamışlardır.

İşlem zamanı karşılaştırması çalışmaları kapsamında, bütün modeller CPU ve GPU üzerinde ayrı ayrı çalıştırılmışlardır. CPU üzerinde; en hızlı çalışan yüz algılayıcısı 0.011 saniye ile BlazeFace, en yavaş çalışan ise 3 saniye ile Dlib olmuştur. GPU üzerinde; en hızlı çalışan model olan FaceBoxes 0,004 saniyede yüz tespiti yaparken, en yavaş çalışan model olan RetinaFace 0,8 saniyede yüz tespiti yapmıştır. Burada, RetinaFace yüz algılayıcısının en yüksek başarı oranına sahip ikinci model olmasına rağmen yüksek işlem zamanı gerektirdiği ortaya çıkmaktadır.

Yüz tespiti yöntemlerinin performans değerlendirmelerine ilaveten, sınırlayıcı kutu belirleme yöntemlerinin analizi yapılmıştır. Bu deneylerde, yüz algılayıcılarının sırasıyla en başarılı beş, dört, üç ve iki tanesi seçilerek ürettikleri sınırlayıcı kutular karşılaştırılan sınırlayıcı kutu belirleme yöntemleri ile iyileştirilmiştir. Bu deneyler neticesinde, en başarılı üç modelin kullanımı ile

gerçekleştirilen çalışmalarda daha başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Diğer taraftan; önerilen Kombinasyonel Oylama yöntemi, en iyi beş, dört ve üç modelin seçildiği senaryolarda diğer yöntemlere nazaran daha başarılı sonuçlar üretmiştir.

Deneylerde yer verilen ortalama alma yöntemi diğer yöntemlerin başarısını değerlendirme konusunda belirleyici bir kriter olmuştur. En iyi üç modelin kullanıldığı çalışmada NMS ve NMW yöntemleri, en iyi dört modelin yer aldığı çalışmada ise NMS ve NMA yöntemleri, sırasıyla ortalama doğruluk değerleri olan %92,6 ve %92,5 oranlarının altında kalmıştır. Bu durum anılan yöntemlerin bazı senaryolarda basit ortalama alma yaklaşımının dahi altında kalarak beklenen performansı sergileyemediklerini ortaya koymaktadır.

En başarılı iki modelin kullanımı ile gerçekleştirilen çalışmada ise Ortalama Alma yöntemi diğer senaryolara göre daha başarılı olmuştur. Bu durum, sınırlayıcı kutu belirleme yöntemlerinin en az üç model ile kullanılmasının daha verimli olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, sınırlayıcı kutu belirleme yöntemlerinin kullanılması, yüz algılayıcıları tarafından üretilen tespit noktalarının başarısını artıracak niteliktedir. Ayrıca, sunulan yöntemlerden Kombinasyonel Oylama yönteminin, mevcut sınırlayıcı kutu belirleme yöntemlerinden daha yüksek başarıya sahip olduğu görülmüştür.

Teşekkür

Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FYL-2023-12497 kodlu proje kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Gerçekleştirilen çalışmalar kapsamında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Benzerlik oranı (iThenticate): %5

Kaynaklar

- [1] Kumar, A., Kaur, A., & Kumar, M. Face detection techniques: a review. *Artificial Intelligence Review*, 52, 927-948. 2019.
- [2] Cho, S. W., Baek, N. R., Kim, M. C., Koo, J. H., Kim, J. H., & Park, K. R. Face detection in nighttime images using visible-light camera sensors with two-step faster region-based convolutional neural network. *Sensors (Switzerland)*, 18(9). 2018. <https://doi.org/10.3390/s18092995>
- [3] Li, J., Zhang, D., Zhang, K., Hu, K., & Yang, L. Real-time face detection during the night. 2017 4th International Conference on Systems and Informatics, ICSAI 2017, 2018-January. <https://doi.org/10.1109/ICSAI.2017.8248358>
- [4] S Liao, A K Jain and S Z. Li, "A fast and accurate unconstrained face detector[J]", *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, vol. 38, no. 2, pp. 211-223, 2016.
- [5] Wang, W., Wang, X., Yang, W., & Liu, J. Unsupervised face detection in the dark. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine*

- Intelligence*, 45(1), 1250-1266. 2023. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2022.3152562>
- [6] Li, J., Wang, Y., Wang, C., Tai, Y., Qian, J., Yang, J., Wang, C., Li, J., & Huang, F. DSFD: Dual shot face detector. 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2019-June, 5055-5064. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2019.00520>
- [7] Dash, P., Kisku, D. R., Gupta, P., & Sing, J. K. Fast face detection using a unified architecture for unconstrained and infrared face images. *Cognitive Systems Research*, 74, 18-38. 2022.
- [8] Gao, Z., Zhang, S., Fang, H., Li, L., & Huang, L. Multi-modal image fusion based improved face detection algorithm in poor lighting conditions. *ACM International Conference Proceeding Series*. 2021. <https://doi.org/10.1145/3483207.3483213>
- [9] King, D. E. Dlib-ml: A machine learning toolkit. *Journal of Machine Learning Research*, 10, 2009.
- [10] Zhang, S., Zhu, X., Lei, Z., Shi, H., Wang, X., & Li, S. Z. FaceBoxes: A CPU real-time face detector with high accuracy. *IEEE International Joint Conference on Biometrics, IJCB 2017, 2018-January*, 1-9. 2018. <https://doi.org/10.1109/BTAS.2017.8272675>
- [11] Bazarevsky, V., Kartynnik, Y., Vakunov, A., Raveendran, K., & Grundmann, M. BlazeFace: Sub-millisecond neural face detection on mobile GPUs. 2019. <http://arxiv.org/abs/1907.05047>
- [12] Xu, Y., Yan, W., Yang, G., Luo, J., Li, T., & He, J. CenterFace: Joint face detection and alignment using face as point. *Scientific Programming*, 2020, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2020/7845384>
- [13] Deng, J., Guo, J., Ververas, E., Kotsia, I., & Zafeiriou, S. (2020). RetinaFace: Single-shot multi-level face localisation in the wild. *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 5202-5211. 2020, <https://doi.org/10.1109/CVPR42600.2020.00525>
- [14] Guo, J., Deng, J., Lattas, A., & Zafeiriou, S. Sample and computation redistribution for efficient face detection. *ICLR 2022 - 10th International Conference on Learning Representations*. 2022.
- [15] Wu, W., Peng, H., & Yu, S. YuNet: A tiny millisecond-level face detector. *Machine Intelligence Research*. 2023. <https://doi.org/10.1007/s11633-023-1423-y>
- [16] Neubeck, A., & van Gool, L. Efficient non-maximum suppression. *Proceedings - International Conference on Pattern Recognition*, 3. 2006. <https://doi.org/10.1109/ICPR.2006.479>
- [17] Solovyev, R., Wang, W., & Gabruseva, T. Weighted boxes fusion: Ensembling boxes from different object detection models. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2021.104117>
- [18] C. Ning, H. Zhou, Y. Song, and J. Tang. Inception single shot multibox detector for object detection. In *ICME*, 2017.
- [19] Panetta, Karen, Qianwen Wan, Sos Ağaian, Srijith Rajeev, Shreyas Kamath, Rahul Rajendran, Shishir Rao et al. "A comprehensive database for benchmarking

- imaging systems." IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2018.
- [20] TUFTS Face DB, TUFTS yüz görüntüsü veri seti depolama alanı, <http://tdface.ece.tufts.edu/>, son erişim 23 Kasım 2023.
- [21] Zou, Z., Chen, K., Shi, Z., Guo, Y., & Ye, J. Object detection in 20 years: A survey. Proceedings of the IEEE. 2023.
- [22] Mamieva, D., Abdusalomov, A. B., Mukhiddinov, M., & Whangbo, T. K. Improved face detection method via learning small faces on hard images based on a deep learning approach. Sensors, 23(1), 502. 2023.
- [23] Adouani, A., Henia, W. M. ben, & Lachiri, Z. A comparison of face detection methods using spontaneous videos. Multimedia Tools and Applications, 81(16), 23163–23191. 2022. <https://doi.org/10.1007/s11042-022-12781-8>
- [24] LabelImg, Tzutalin LabelImg Git code (2015). <https://github.com/tzutalin/labelImg>, son erişim 24 Kasım 2023.
- [25] R. Vaillant, C. Monrocq, and Y. Le Cun. Original approach for the localisation of objects in images. IEE Proceedings Vision, Image and Signal Processing, 1994.
- [26] Liu, W., Anguelov, D., Erhan, D., Szegedy, C., Reed, S., Fu, C. Y., & Berg, A. C. SSD: Single shot multibox detector. Lecture Notes in Computer Science (Including subseries lecture notes in artificial intelligence and lecture notes in bioinformatics), 9905 LNCS. 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46448-0_2
- [27] Girshick, R. Fast r-cnn. In Proceedings of the IEEE international conference on computer vision (pp. 1440-1448). 2015.
- [28] Ren, S., He, K., Girshick, R., & Sun, J. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks. Advances in Neural Information Processing Systems, 2015-January.
- [29] Sandler, M., Howard, A., Zhu, M., Zhmoginov, A., & Chen, L. C. MobileNetV2: Inverted residuals and linear bottlenecks. Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2018. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00474>
- [30] Lin, T. Y., Dollár, P., Girshick, R., He, K., Hariharan, B., & Belongie, S. Feature pyramid networks for object detection. Proceedings - 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2017, 2017-January. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.106>
- [31] He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. Deep residual learning for image recognition. Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016-December. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90>
- [32] Radosavovic, I., Kosaraju, R. P., Girshick, R., He, K., & Dollár, P. Designing network design spaces. Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.2020, <https://doi.org/10.1109/CVPR42600.2020.01044>
- [33] Liu, S., Qi, L., Qin, H., Shi, J., & Jia, J. Path Aggregation Network for Instance Segmentation. Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.2018. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00913>
- [34] Zhou, H., Li, Z., Ning, C., & Tang, J. CAD: Scale invariant framework for real-time object detection. proceedings - 2017 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops, ICCVW 2017, 2018-January. <https://doi.org/10.1109/ICCVW.2017.95>





Investigation of treatability of automotive industry wastewaters by coagulation-flocculation, fenton and UV/H₂O₂

Otomotiv endüstrisi atıksularının koagülasyon- flokülasyon, fenton ve UV/H₂O₂ prosesleri ile arıtılabilirliğinin incelenmesi

Semih Ayberk Aldıç¹ , Gamze Sönmez^{2,*} 

^{1,2}Aksaray University, Faculty of Engineering, Department of Environmental Engineering, 68100 Aksaray Türkiye

Abstract

In the automotive industry, painting operations have emerged as a major source of environmental concerns. In this study, the treatability of wastewater obtained from the automotive industry painting process was investigated by using coagulation-flocculation, ultraviolet/hydrogen peroxide (UV/H₂O₂), and Fenton processes. The effects of pH, coagulant, and anionic polymer doses were examined for three different coagulants in the coagulation-flocculation process. Optimal conditions were determined based on chemical oxygen demand (COD) and turbidity removal efficiency. As a result of the study, the optimum conditions for the coagulant identified as ferric chloride, which achieved the highest COD removal of 49.6% and turbidity removal of 74.4%, were determined as pH 8, coagulant dose of 400 mg L⁻¹, and anionic polymer dose of 1 mg L⁻¹. In the second stage of the study, Fenton and UV/H₂O₂ processes were applied to the effluent of the coagulation-flocculation process to increase the removal efficiency. When the results were evaluated, it was observed that the maximum COD removal efficiency of 63.4% was attained under the conditions of pH 3 and 400 mg L⁻¹ H₂O₂ concentration applied in the UV/H₂O₂ process. However, in the Fenton process, a maximum COD removal efficiency of only 51% was achieved. From this study, it can be concluded that the UV/ H₂O₂ process applied after coagulation-flocculation increases the removal efficiency and can be an alternative and effective treatment process for wastewater from the automotive painting process.

Keywords: Automotive industry, Coagulation-flocculation, Fenton, UV/H₂O₂

1 Introduction

The automotive industry is a continuously evolving sector shaped by technological innovations and consumer demands. It also holds significant economic value, with high export capacity and importance in terms of employment. However, due to the complex processes involved, it exhibits considerably high rates of water and energy consumption. Numerous natural resources are consumed throughout the automobile manufacturing process, and a variety of hazardous and non-hazardous gaseous, liquid, and solid wastes are produced [1]. Therefore, waste management,

Özet

Otomotiv endüstrisinde boyama prosesleri, çevresel endişelerin ana kaynaklarından biri olarak ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada otomotiv endüstrisi boyama prosesinden elde edilen atıksuyun koagülasyon-flokülasyon, ultraviyole/hidrojen peroksit (UV/H₂O₂) ve Fenton prosesleri ile arıtılabilirliği incelenmiştir. Koagülasyon-flokülasyon prosesinde farklı pH, koagülant ve anyonik polimer dozlarının etkisi karşılaştırılmış ve optimum şartlar kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve bulanıklık giderim verimine göre belirlenmiştir. Çalışma sonucunda en yüksek %49.6 KOİ ve %74.4 bulanıklık giderim veriminin elde edildiği koagülant olarak tespit edilen demir (III) klorür için optimum koşullar pH 8, koagülant konsantrasyonu 400 mg L⁻¹ ve anyonik polimer dozu 1 mg L⁻¹ olarak belirlenmiştir. Giderim verimini arttırmak amacıyla koagülasyon-flokülasyon prosesi çıkış suyuna Fenton ve UV/H₂O₂ prosesleri uygulanmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde maksimum KOİ giderim verimi pH=3 ve 400 mg L⁻¹ H₂O₂ konsantrasyonunda uygulanan UV/ H₂O₂ prosesi ile % 63.4 olarak elde edilmiştir. Ancak Fenton prosesinde ise maksimum %51 KOİ giderimi sağlanabilmiştir. Bu çalışmadan, koagülasyon flokülasyon ardından uygulanacak UV/H₂O₂ prosesinin giderim verimini arttırdığı ve otomotiv endüstrisi boyama prosesi atıksuları için alternatif ve etkili bir proses olabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Otomotiv endüstrisi, Koagülasyon-flokülasyon, Fenton, UV/H₂O₂

compliance with environmental regulations, recycling initiatives, and sustainability practices are of great significance for this sector.

Wastewaters originating from the automotive industry, obtained from various processes, exhibit diverse characteristics and, due to their contents, can pose significant environmental issues within industrial effluents. The painting, assembling, surface finishing, metal casting, and production of metal and plastic components are some of these processes [2, 3]. The wastewater from these processes contains pollutants such as paints, heavy metals, phosphate, solids in the suspension, chemical oxygen demand (COD),

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: gamzesonmez58@gmail.com (G. Sönmez)
Geliş / Received: 14.11.2023 Kabul / Accepted: 15.01.2024 Yayımlanma / Published: 15.04.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1390665

biological oxygen demand (BOD), detergents, oils, and are extremely dangerous because of their toxic content, although they are not voluminous [4]. Among these processes, one of the most hazardous is the painting process, due to the use of hazardous chemicals and resulting waste [5]. Despite the automotive industry having advanced technologies and production facilities, the wastewater from the painting process, in particular, leads to high levels of environmental pollution due to its high COD, heavy metal, and phosphorus content [6]. In many studies, the painting and coating process takes the lead in the environmental issues caused by vehicle manufacturing, constituting 60-80% of environmental risks [7-10]. It is known that the typical COD of the paint shop wastewater varies between 1400-11400 mg L⁻¹, and this value can differ depending on the equipment used, operational/cleaning processes, and the type of chemicals used [11-13]. It is seen that various treatment processes are applied under different conditions to make such wastewater comply with discharge standards [2]. In Turkey, discharge limits that must be adhered to on a sectoral basis have been established and published in the "Water Pollution Control Regulation." In this regulation, discharge limits for vehicle factories are specified [14].

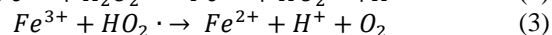
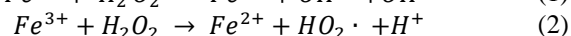
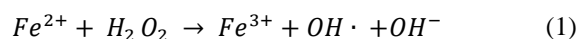
In the literature, various treatment techniques have been experimented with and their effectiveness investigated to treat wastewater originating from automotive paint processes and other manufacturing stages. According to result of study carried out by Kuybu [15], the wastewater has subjected to treatment processes such as sand filtration, activated carbon adsorption, ultrafiltration, and reverse osmosis (RO). In the first treatment stage, sand filtration achieved a 90% removal efficiency for suspended solids (SS), in the activated carbon adsorption process, a 68% removal of COD, a 58% removal of nitrate (NO₃) was observed, and finally, after the application of the reverse osmosis process, a 99% removal efficiency in conductivity output values was achieved.

In another study applying the electrocoagulation process for automotive industry wastewater, it was possible to achieve, at optimum parameter values, 95% oil removal, 87.4% COD removal, and 70.6% mineralization values. Additionally, a final biodegradability of 0.54 (BOD₅/COD) was reached [16]. In a study examining treatment with an anaerobic sequential batch biofilm reactor, it was reported that an 88% removal efficiency was achieved at a volumetric loading rate (VLR) of 3.09 g COD/L day [12].

Among various treatment techniques in the literature, it has been suggested that physical-chemical technologies including coagulation-flocculation and advanced oxidation processes may be suitable for the treatment of such wastewater [17]. Coagulation-flocculation is one of the important processes used in the treatment of water and industrial wastewater [18]. This process is widely preferred due to its high removal efficiency, ease of application, as well as its lower energy requirements compared to alternative technologies, and economic efficiency [19]. The coagulants added to wastewater disrupt the electrostatic charges of colloidal and dissolved substances in the water, neutralizing particle charges. In this way, particles come together to form larger and more rapidly settling masses [20,

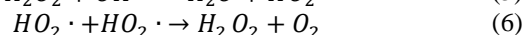
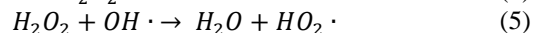
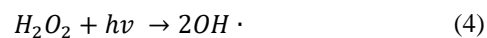
21]. The most commonly preferred coagulants in the coagulation-flocculation process are aluminum sulfate (alum), iron(II) sulfate, iron(III) chloride, and iron chlorosulfate (FeClSO₄) [10]. Every coagulant exhibits optimal pollutant removal at an ideal pH and functions best in a particular pH range. The width of this pH range is influenced by the type of coagulant used, the characteristics of the wastewater, and the coagulant dosage [22].

Advanced oxidation processes are based on the production of hydroxyl radicals (E⁰=2.8 eV) [23]. One of these processes, Fenton oxidation, is based on the formation of highly potent oxidizing hydroxyl radicals through the reaction of H₂O₂ with Fe²⁺ ions in an acidic environment [24, 25]. Hydroxyl radicals (OH·) rapidly mineralize most practically organic pollutants and transform them into less or non-toxic products. The commonly acknowledged mechanism of the Fenton process is illustrated in Equation (1)–(3) [26].



The efficiency of the Fenton reaction varies depending on various parameters such as pH, temperature, concentrations of reactants, and the quantities of organic and inorganic pollutants [24]. The main advantages of the process include reasonable initial investment costs, high pollutant removal efficiencies, ecological safety, low toxicity for potential subsequent biological treatment, partial inactivation of toxic and recalcitrant compounds, stability in treating various chemical substances, and operability without the need for additional equipment [25].

In the UV/H₂O₂ oxidation process, the primary oxidizing agent is the hydroxyl radical, which is generated through UV radiation in the presence of hydrogen peroxide. These radicals react with organic pollutants, chemically oxidizing organic matter. In this way, a H₂O₂ decomposition-formation cycle occurs. The mechanism of the UV/H₂O₂ process is illustrated in Equation (4)–(6) [27, 28].



In other words, UV light triggers the decomposition of hydrogen peroxide into two hydroxyl radicals. Subsequently, these radicals engage with organic pollutants, initiating the chemical oxidation of organic matter. The reaction time depends on the pollution load and the complexity of the wastewater. The reaction is completed at the end of a certain period, and even if the process continues beyond that time, no increase in efficiency is observed [29]. The UV/H₂O₂ process also offers advantages such as no sludge formation during treatment and suitability for operation under ambient conditions [30].

Considering these factors, the main objective of this study is to explore the feasibility of treating wastewater produced during the painting process in the automotive

industry. The study includes a two-step approach, starting with coagulation-flocculation and then assessing the effectiveness of two distinct advanced oxidation processes: Fenton and UV/H₂O₂.

Optimum conditions were determined by evaluating the results obtained under different process conditions. The removal efficiencies after treatment were evaluated based on COD and turbidity parameters. The results obtained will contribute to reducing the environmental impact of wastewater from the automotive industry painting process and help in the development of alternative treatment methods for similar wastewater.

2 Materials and methods

2.1 Wastewater collection and characterization

Wastewater used in this study was obtained from the wastewater treatment plant equalization tank entrance of a facility located in Aksaray and operating in the painting of plastic exterior parts. The wastewater samples were stored in the laboratory at 4°C. During the wastewater characterization, analyses were conducted for COD (SM 5220 C), Conductivity (SM 2510 B), Turbidity (SM 2130B), pH (SM 4500B), Total Nitrogen (EN ISO 12260), Ammonium NH₄-N (SM 4500), and Phosphate PO₄-P (SM 4500 P) [31]. The main physico-chemical characteristics of this wastewater are summarized in Table 1.

Table 1. Characterization of the automotive industry painting process wastewater used in the study.

Parameters	Unit	Concentration/Value
COD	(mg L ⁻¹)	14744±734.54
TDS	(mg L ⁻¹)	4.13±0.02
pH	-	7.29±0.12
EC	(mS cm ⁻¹)	4.76±0.08
Turbidity	(NTU)	682.20±12.97
NH ₄	(mg L ⁻¹)	5.29±0.65
NH ₄ -N	(mg L ⁻¹)	4.12±0.51
PO ₄	(mg L ⁻¹)	17.98±1.05
PO ₄ -P	(mg L ⁻¹)	5.78±0.11
NO ₃	(mg L ⁻¹)	153.27±5.23
NO ₃ -N	(mg L ⁻¹)	35.29±5.23

2.2 Experimental setups

Within the scope of this study, treatability studies of wastewater taken from the automotive industry painting process output were conducted in two phases: first, chemical treatment, and then advanced oxidation processes applied to the effluent of the chemical treatment. The processes used for the wastewater treatment are summarized in the flow diagram in Figure 1.

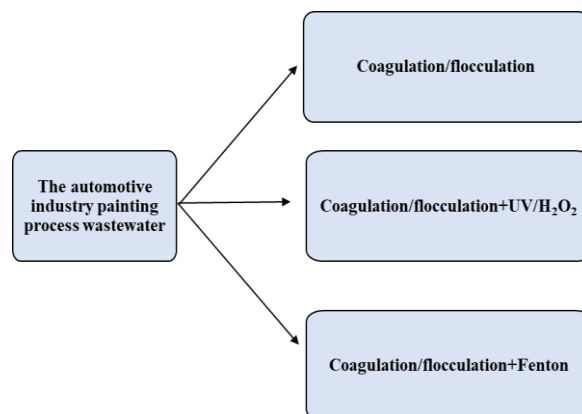


Figure 1. Treatment processes applied for wastewater treatment of automotive industry painting process.

2.2.1 Coagulation-flocculation process

In coagulation-flocculation studies, three different coagulants were used: aluminum sulfate (Al₂(SO₄)₃·18H₂O, M= 666.42 g mol⁻¹), iron (II) sulfate (FeSO₄·7H₂O, M= 278.2 g mol⁻¹), and iron (III) chloride (FeCl₃·6H₂O, M=270.32 g mol⁻¹). Anionic polymer (SNF Floerger Flopam AN 905 PWG) was used as a coagulant aid.

Coagulation-flocculation experiments were carried out in the classical jar test (Velp-Scientifica JLT6) setup and at room temperature (24 ± 2°C). At the beginning of the study, 2 g L⁻¹ stock coagulant solutions were prepared using ultrapure water. To determine the optimum pH, 200 mL wastewater samples were placed in 500 mL beakers, and pH values were adjusted to selected values between 4, 5, 6, 7, 8, and 9. pH adjustment was carried out with 6 N sodium hydroxide (NaOH) and 6 N sulfuric acid (H₂SO₄) solutions. The prepared wastewater samples were mixed rapidly at 100 rpm for 3 minutes and then slowly mixed at 30 rpm for 20 minutes. After mixing, the wastewater was left to precipitate for 30 minutes. The COD and turbidity levels were measured in the supernatant samples. At this stage, the coagulant doses in each beaker were kept constant.

In the second stage of the coagulation-flocculation studies, coagulant doses ranging from 30, 60, 120, 200, 300, and 400 mg L⁻¹ were studied at the determined optimum pH value. Finally, an anionic polymer study was carried out at doses between 0.25-0.50-1-2-3, and 4 mg L⁻¹ at the determined optimum coagulant dose and pH value. Thus, the optimum pH, coagulant, and anionic polymer dosage were determined. All studies were repeated for three coagulants.

2.2.2 UV/H₂O₂ process

At this stage of the study, UV/H₂O₂, an advanced oxidation process, was applied to the wastewater taken from the exit of the coagulation-flocculation process carried out under optimum conditions. The UV/H₂O₂ process was carried out on 350 ml wastewater samples placed in a photoreactor PURFECT 01 model, emitting light at 50 Hz, 220 V, 254 nm. In the study, firstly, the pH values of the wastewater samples were adjusted to 3, 5, 7, and 9 to determine the optimum pH value. Before the samples were given to the reactor, the H₂O₂ stock solution prepared at 250 g L⁻¹ concentration was added to the beakers on the magnetic

stirrer in a volume that would provide a constant 400 mg L⁻¹ H₂O₂ concentration. For the H₂O₂ stock solution, 30% H₂O₂ with a density of 1.11 g cm⁻³, obtained from Merck, was used. During the optimal pH studies, samples were collected from the UV reactor outlet at 5, 10, 15, 30, 45, 60, 75, and 90 minutes. In the second stage of the study, different H₂O₂ concentrations ranging from 300 to 800 mg L⁻¹ were investigated at the optimum pH value determined in the first stage. The experimental setup used in the UV/ H₂O₂ process is provided in Figure 2.



Figure 2. The experimental setup used in the feasibility study of treating with the UV/H₂O₂ process

2.2.3 Fenton process

In order to improve the COD removal efficiency, the Fenton process was applied by taking the wastewater coagulated under optimum conditions. Thus, it was aimed to evaluate a second alternative and determine the optimum conditions for the advanced treatment process that can be applied after coagulation. All studies on the Fenton process were carried out at pH<3.5 and 250 mL volume. 6 N H₂SO₄ solution was added to the beakers in the required amounts to ensure pH<3.5. Since it is known in the literature that the Fenton process is effective at low pH levels (<3.5) according to the operational procedure, an optimum pH study was not conducted within the scope of this study [32-34]. During the process, the beakers in the jar test setup were stirred for a total of 30 minutes, with 5 minutes at a high speed of 200 rpm and 25 minutes at a slow speed of 15 rpm. When the process time was completed, the pH was increased again to 8-8.5 with 6N NaOH solution to stop the formation of OH⁻ radicals and terminate the process.

At the end of the process, the samples in the beakers were left to settle for 60 minutes. In the last stage, COD analyses were performed on the samples taken from the upper phase of each beaker.

3 Results and discussions

3.1 Determining optimum pH for coagulation flocculation

One of the preferred and important processes in the treatment of water and industrial wastewater is the coagulation-flocculation process [18]. This process is easy to apply and, at the same time, is a highly effective method for the removal of heavy metals and inorganic compounds [10]. In this study, experiments were conducted with aluminum

sulfate (alum), iron (II) sulfate, and iron (III) chloride coagulants at pH values of 4, 5, 6, 7, 8, and 9 using a jar test apparatus. The results obtained for all three coagulants were comparatively evaluated, as seen in Figure 3. The optimum pH values for aluminum sulfate, iron (III) chloride, and iron (II) sulfate were determined to be 7, 9, and 8, respectively. At these pH values, COD removal efficiencies were found to be 28.06%, 44.16%, and 39.44%, while turbidity removal efficiencies were 45.24%, 72.88%, and 76.37%, respectively.

COD and turbidity removal efficiencies showed a decreasing trend at pH values higher and lower than the specified optimum pH values for each coagulant. The pH parameter is an effective factor on the physicochemical properties of wastewater as well as the removal rate of pollutants in the water [35]. In the chemical coagulation process, the pH value determines the dominant hydrolysis species in destabilization with hydrolyzed metal coagulants. The pH value at which the most efficient hydrolysis species of the coagulant are formed in the process is of great importance for the achievement of optimal coagulation [22, 36, 37].

In a study from the literature, COD removal was aimed at the wastewater obtained from a spare parts manufacturing facility for automobiles using the coagulation-flocculation process, and in parallel with this study, investigations were carried out on the optimum pH, coagulant dosage, and anionic polymer dosage. In experiments conducted for three different coagulants, the optimum pH was found to be 7 for aluminum sulfate, and at this pH, a COD removal of 36% was achieved. For iron (III) chloride, the optimum pH was determined to be 6, with a COD removal of 51% [38]. In another study, iron (III) chloride was used as a coagulant in the treatment of wastewater from the automotive industry, and a COD removal of 80% was achieved under the conditions of pH 8 and a coagulant dosage of 0.8 mL⁻¹ [10].

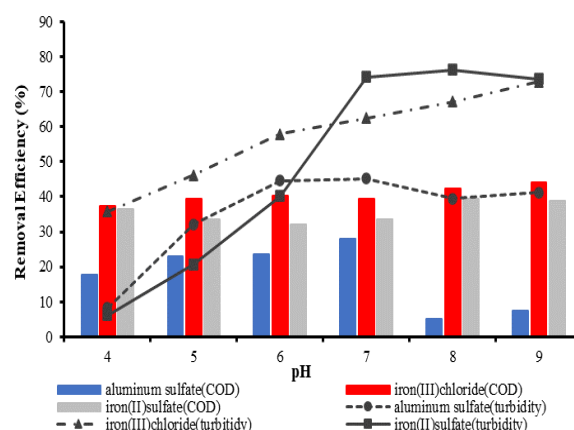


Figure 3. Effect of pH on the COD and, turbidity removal by coagulation-flocculation process

3.2 Determining optimum coagulant dose for coagulation flocculation

During the second phase of coagulation-flocculation studies, the impact of varying coagulant concentrations on the efficiency of COD and turbidity removal was

investigated. For each coagulant, coagulant doses ranging from 30 to 400 mg L⁻¹ were studied at the optimum pH values obtained in the first stage. The results obtained are presented in Figure 4.

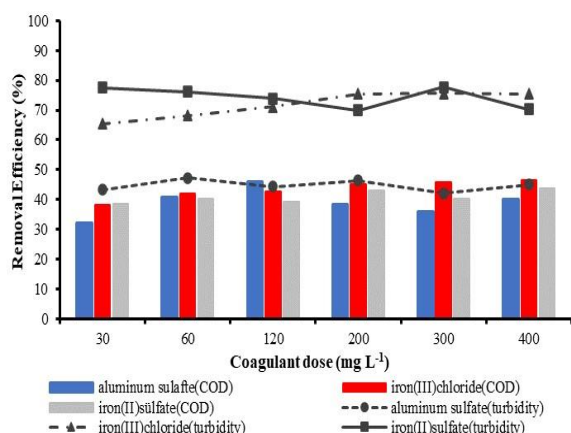


Figure 4. Effect of coagulant dose on COD and turbidity removal by coagulation-flocculation process (pH=7 for Al₂(SO₄)₃, pH=9 for FeCl₃, pH=8 for FeSO₄)

The optimum coagulant doses were determined as 120 mg L⁻¹ for aluminum sulfate and 400 mg L⁻¹ for iron (III) chloride and iron (II) sulfate, with COD removal efficiencies of 45.87%, 46.64%, and 43.87%, respectively, at these concentrations. Turbidity removal efficiencies were found to be 44.42% for aluminum sulfate, 75.54% for iron (III) chloride, and 70.25% for iron (II) sulfate. In coagulation-flocculation processes, commonly used inorganic metal salts include aluminum sulfate, iron sulfate, ferric chloride, and ferric chlorosulfate. Among these, iron salts are generally more effective than aluminum salts. [10].

When the obtained COD removal efficiencies are evaluated, it can be observed that the removal efficiency is lower at concentrations below or above the optimum dose. In particular, in the studies conducted for ferric chloride and ferrous sulfate, higher coagulant doses were tested after obtaining the highest removal efficiencies at 400 mg L⁻¹. However, it was determined that the removal efficiency decreased at higher concentrations. In a similar study using aluminum sulfate and ferric chloride as coagulants, the maximum COD removal efficiency for aluminum sulfate was determined to be 46% at the optimum coagulant dose of 100 mg L⁻¹, while for ferric chloride, the maximum COD removal efficiency reached 60% at a coagulant concentration of 200 mg L⁻¹. In the same study, it was noted that parallel to these study results, the use of higher coagulant concentrations led to a decrease in removal efficiency [38]. In another study conducted on wastewater from the automotive industry, PAC and FeCl₃ were utilized as coagulants. A COD removal efficiency of 85% was achieved with a PAC dosage of 1.0 mL L⁻¹ at pH 6.5, while for FeCl₃, the highest removal efficiency, 80%, was determined at a dosage of 0.8 mL L⁻¹ and pH 9.5 [10]. According result of study carried out by Karchiyappan [3], three types of processes, namely ozonation (ON), Electro-Fenton process (EFP), and chitosan-based coagulation (CBC), have been

employed for the removal of turbidity from automotive industry wastewater. By the model, optimal conditions for each process resulted in a turbidity removal rate exceeding 55%.

3.3 Determining optimum anionic polymer dose for coagulation flocculation

In the final stage of the coagulation-flocculation process studies, the effect of the anionic polymer as a coagulant aid was investigated by testing varying doses ranging from 0.25 to 4 mg L⁻¹. The results obtained from the experiments carried out by keeping the optimum coagulant dose and pH values determined separately for each coagulant are given in Figure 5.

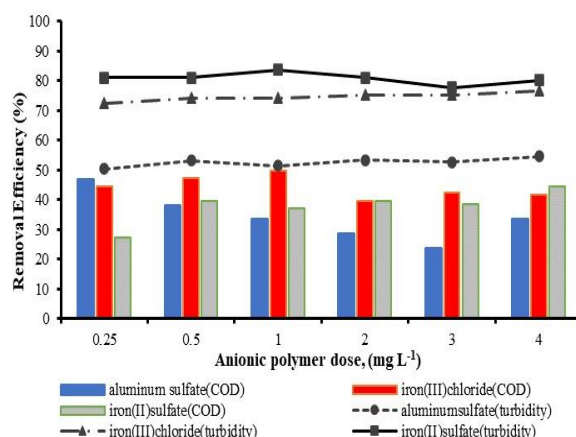


Figure 5. Effect of anionic polymer dose on COD and turbidity removal by coagulation-flocculation process (pH=7 and coagulant dose=120 mg L⁻¹ for Al₂(SO₄)₃, pH=9 and coagulant dose=400 mg L⁻¹ for FeCl₃, pH=8 and coagulant dose=400 mg L⁻¹ for FeSO₄)

The optimum anionic polymer doses were determined as 0.25 mg L⁻¹ for aluminum sulfate, 1 mg L⁻¹ for ferric chloride, and 4 mg L⁻¹ for ferrous sulfate. The COD removal efficiencies for aluminum sulfate, ferric chloride, and ferrous sulfate were found to be 46.64%, 49.60%, and 44.57%, respectively. When evaluating turbidity removal, the results obtained for each coagulant showed that an increase in the anionic polymer dose did not lead to a significant change in turbidity removal efficiency. However, turbidity removal efficiencies increased significantly compared to the previous stage where only coagulants were used. At the optimum anionic polymer doses, we determined by evaluating the turbidity and COD removal efficiencies together, 50%, 74% and 80% turbidity removal efficiencies were determined for alum, iron (III) chloride and iron (II) sulfate, respectively.

Furthermore, in this stage of the study, to assess the influence of the sedimentation time applied at the end of the coagulation-flocculation process, turbidity measurements were taken not only at 30 minutes but also at 60 minutes after the process. The obtained turbidity values are presented in Figure 6. The increase in sedimentation time was observed to have no significant effect on turbidity removal. When comparing all three coagulants, it was observed that iron (II) sulfate was more effective in turbidity removal compared to

the other two coagulants. However, it did not provide the same level of performance in COD removal.

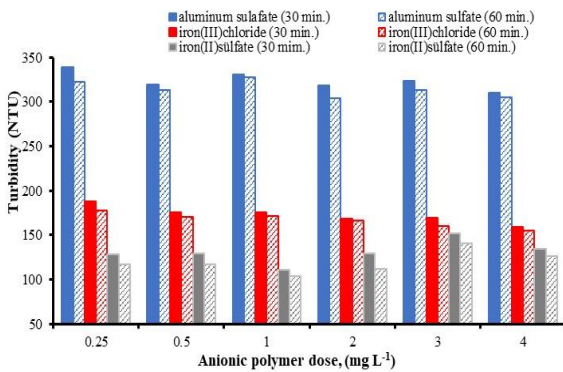


Figure 6. Effect of anionic polymer dosage and settling time in turbidity removal by coagulation-flocculation process.

As a part of the wastewater treatment study on automotive industry painting process effluents, the initial stage involved the coagulation-flocculation process. The obtained optimal conditions and removal efficiencies for three different coagulants are summarized in Table 2.

3.4 Effect of UV/H₂O₂ process on COD removal

Advanced oxidation processes are primarily employed for the removal of challenging and hazardous pollutants present in industrial wastewater, surface waters, and groundwater. These processes generate highly potent and non-selective oxidizing species, known as hydroxyl radicals (OH·), to facilitate the degradation of pollutants [39]. In this study, UV/H₂O₂, one of the advanced oxidation processes, was studied in the automotive industry painting process wastewater taken from the output of the coagulation-flocculation process carried out under optimum conditions. Similarly, there are studies in the literature where advanced oxidation processes are applied to wastewater taken from the output of the coagulation-flocculation process for different wastewater types [40, 41]. Firstly, the results obtained from the UV/H₂O₂ process studies carried out at different pH values are given in Figure 7.

It was observed that higher COD removal efficiencies were obtained at lower pH values. The highest COD removals of 63.39%, 57.90%, 51.43% and 50.49% were obtained at pH values of 3-5-7 and 9, respectively. Maximum COD removal was achieved at pH=3 and 30 minutes with a removal percentage of 63%. This can be stated as the rapid decomposition of hydroxyl radicals and hydrogen peroxide at low pH values, as in similar studies. [42]. When many studies on this subject are examined, it has been stated that the oxidizing ability of H₂O₂ decreases and becomes unstable at high pH values and has a negative effect on the oxidation reaction and significantly reduces the formation of OH radicals. However, at low pH value (pH<2), H₃O₂⁺ is formed and in this case, the formation of OH radical becomes difficult. [25, 39, 43].

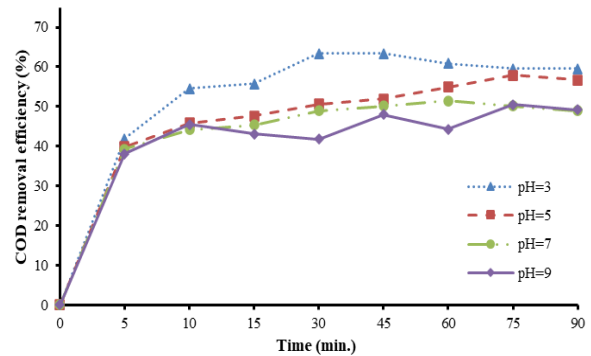


Figure 7. Effect of pH on the COD removal during UV/H₂O₂ process (H₂O₂ = 400 mg L⁻¹).

At this stage, where the effect of pH on the UV/H₂O₂ process was examined, samples were taken at different times until the end of the 90-minute oxidation period. Thus, the effect of oxidation time on the removal efficiency was observed. It was observed that the increase after 30 minutes did not have significant effect on COD removal efficiencies at all pH values.

In the second step of the UV/H₂O₂ studies, varying H₂O₂ concentrations between 300 and 800 mg L⁻¹ were investigated to determine the effect of H₂O₂ concentration, while keeping the pH value constant at 3. The results are presented in Figure 8. The maximum COD removal efficiency of 63.4% was obtained at a concentration of 400 mg L⁻¹ H₂O₂. The highest COD removal efficiencies obtained at 500, 600 and 800 mg L⁻¹ H₂O₂ concentrations were determined as 50%, 51% and 51%, respectively. It was observed that an increase in H₂O₂ concentration beyond 400 mg L⁻¹ did not significantly affect the COD removal efficiency. The reason for this is that, as explained in similar studies, when hydrogen peroxide concentration is added above the optimum values, it can consume hydroxyl radicals in the solution and act as a scavenger for hydroxyl radicals [39]. On the other hand, at hydrogen peroxide concentrations below the optimum level, an insufficient amount of hydroxyl radicals is generated, which can lead to a decrease in removal efficiency [30].

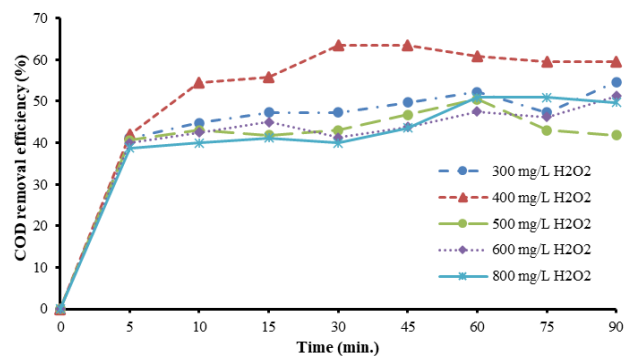


Figure 8. Effect of H₂O₂ dose on the COD removal during UV/H₂O₂ process (pH=3)

Table 2. The optimum process conditions for COD and turbidity removal through coagulation-flocculation and the obtained removal efficiencies (Rapid mixing: 3 min at 100 rpm; slow mixing: 20 min at 30 rpm).

Coagulants	Optimum conditions			Removal efficiencies (%)		
	pH	Coagulant dose (mg L ⁻¹)	Anionic polymer dose (mg L ⁻¹)	COD	Turbidity (Settling time:30 min.)	Turbidity (Settling time:60 min.)
Al ₂ (SO ₄) ₃ .18H ₂ O	7	120	0.25	46.6	50.3	52.7
FeCl ₃ .6H ₂ O	9	400	1	49.6	74.2	74.9
FeSO ₄ .7H ₂ O	8	400	4	44.6	80.2	81.4

3.5 Effect of Fenton process on COD removal

In the final stage of the study, the wastewater obtained after treatment under the determined optimum conditions in the coagulation-flocculation process was subjected to the Fenton process. In recent years, the Fenton process has been efficiently used for the removal of many hazardous organic compounds from wastewater [44]. In the literature, the most suitable pH value for the Fenton process is generally accepted to be in the range of 3-3.5; therefore, an optimum pH study was not conducted in this research [25, 44-46]. Firstly, H₂O₂ concentrations ranging from 250-1500 mg L⁻¹ were studied at a fixed Fe²⁺ concentration of 100 mg L⁻¹. When the results given in Figure 9 are examined, the highest COD removal was obtained as 47.57% at 250 mg L⁻¹ H₂O₂ concentration. The COD removal efficiencies ranging from 40% to 42% were achieved at H₂O₂ concentrations of 500, 750, 1000, 1250, and 1500 mg L⁻¹. As shown in Figure 9, the increase in H₂O₂ concentration did not significantly impact the removal efficiency. In the Fenton process, the concentration of H₂O₂ plays a crucial role in determining the overall efficiency of the degradation process. The source of OH radicals formed in Fenton oxidation is hydrogen peroxide. Typically, it has been observed that an increase in hydrogen peroxide dosage leads to a higher percentage of pollutant degradation [44, 47]. However, the generated OH· is not selective toward either the pollutants or the excess H₂O₂ in the solution [48]. Therefore, the concentration of H₂O₂ should be adjusted to achieve the optimum dosage. In this study 250 mg L⁻¹ H₂O₂ was chosen optimum dose. The presence of an excess of H₂O₂ beyond the optimum level in the environment, ferric ions react with hydrogen peroxide to form HO₂·, which has a lower oxidizing ability, leading to the formation of iron hydroxyl sludge. In this case, the Fenton process can lead to an increase in COD and pollution in the treated water [44, 49, 50].

In the second stage of the study for the Fenton process, Fe²⁺ concentrations ranging from 25-150 mg L⁻¹ were studied. The results are presented in Figure 10. The highest COD removal was determined as 51.14% at 75 mg L⁻¹ Fe²⁺ concentration. COD removal efficiencies obtained at Fe²⁺ concentrations below and above this concentration were lower. Thus, the optimum Fe²⁺ concentration in the Fenton process applied for automotive industry painting process wastewater was determined as 75 mg L⁻¹.

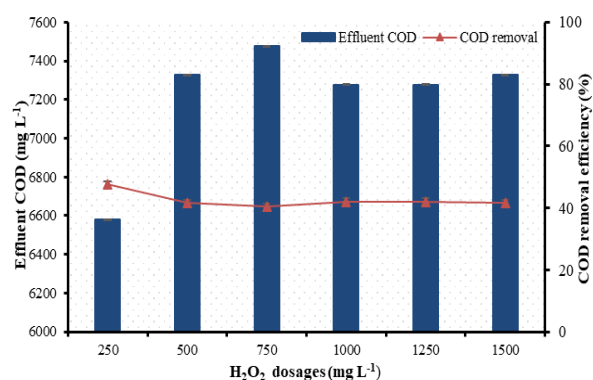


Figure 9. Effect of H₂O₂ dose on the COD removal during Fenton process (pH =3-3.5 and Fe²⁺ =100 mg L⁻¹).

In Fenton oxidation, Fe²⁺ ion reacts with H₂O₂ and forms OH radicals. In the absence of Fe²⁺ ion and since OH radicals cannot be formed; effective oxidation does not occur. The reaction rate and the production of the OH radical increase simultaneously with the rise in the concentration of this ion. Nevertheless, an excessive increase in Fe²⁺ ion concentration may lead to an undesirable increase in the total dissolved solid content or the quantity of suspended iron at the process outlet [25, 44, 50, 51].

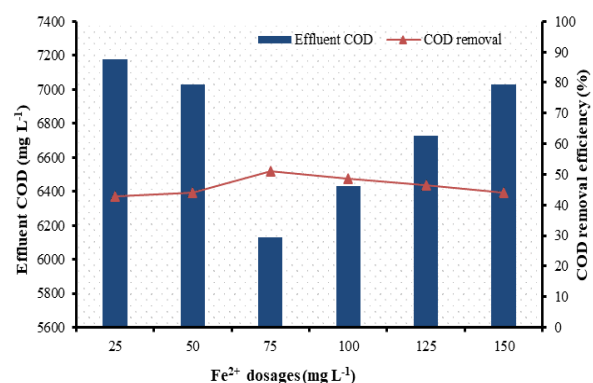


Figure 10. Effect of Fe²⁺ dose on the COD removal during Fenton process (pH =3-3.5 ve H₂O₂=250 mg L⁻¹).

In a similar study conducted for the painting process in the automotive industry, the initial COD value, which was 4435 mg L⁻¹, could only be reduced to 4365 mg L⁻¹ at the process outlet using the Fenton process. It has been stated that this situation is probably due to the presence of high stability and permanence antioxidant substances used as additives in paints and the non-degradability of these substances [17].

4 Conclusions

In this study, the wastewater generated from an automotive industry painting process was investigated for turbidity and COD removal efficiencies. The raw wastewater was obtained from the balancing tank entrance of the treatment plant. The wastewater was initially treated with coagulation-flocculation, followed by the application of advanced oxidation processes, specifically Fenton and UV/H₂O₂, to the effluent from this process. The coagulation-flocculation studies were conducted using three different coagulants: aluminum sulfate (alum), iron (II) sulfate and iron (III) chloride achieved %47, %50, and, %45 for COD removal, and %50, %74, and, %80 for turbidity removal, respectively. According to these results, it was determined that the most suitable coagulant is iron (III) chloride, and the optimum conditions for this coagulant are pH=9, 400 mg L⁻¹ H₂O₂, and 1 mg L⁻¹ anionic polymer dose.

In the second stage of the study, the aim was to enhance the COD removal efficiency by applying UV/H₂O₂ and Fenton advanced oxidation processes separately to the wastewater obtained from the coagulation-flocculation process carried out under optimum conditions and using iron (III) chloride as the coagulant. As a result of the studies conducted on the UV/H₂O₂ process, the optimum conditions were determined as pH=3, H₂O₂ concentration of 400 mg L⁻¹, and a process time of 30 minutes. Under these optimum conditions, it was found that the COD removal efficiency increased from 50% to 63.4%. Additionally, it was determined that there is a decreasing trend in COD removal efficiency at H₂O₂ concentrations above 400 mg L⁻¹ in the UV/H₂O₂ process. However, when the Fenton process was applied to the wastewater obtained from the coagulation-flocculation process, it did not result in a significant increase in COD removal. This can be attributed to the nature and concentration of contaminants that could potentially hinder the effectiveness of the Fenton process.

In light of all these results, the discharge limit of 300 mg L⁻¹ for the COD parameter cannot be achieved in the effluent of both treatment processes. However, compared to similar industrial wastewaters in the literature, the COD value of the studied wastewater is quite high. Therefore, the achieved 63.4% COD removal with coagulation-flocculation + UV/H₂O₂ processes is significant. This can contribute to reducing the potential adverse effects of automotive industry painting process wastewaters or similar industrial wastewaters on the environment. In future research, alternative advanced oxidation processes, as well as relatively new and updated applications of Fenton, could be employed for the treatment of wastewater from the automotive industry dyeing process, with a particular focus on COD removal.

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 19 %

References

[1] G. Salihoglu ve N. K. Salihoglu, A review on paint sludge from automotive industries: Generation,

- characteristics and management, *Journal of environmental management*, 169, 223-235, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.12.039>.
- [2] N. Aleksic, V. Šušteršič, D. Gordić, D. Nikolić ve N. Rakić, Reduction of water consumption in waste water treatment systems in the automotive industry, 2019. <https://scidar.kg.ac.rs/handle/123456789/15488>.
- [3] T. Karchiyappan, Studies on treatment of automotive industry wastewater using ozonation, electro-Fenton and chitosan based coagulation process, *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 5, 100178, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.10.0178>.
- [4] F. Ansari, Y. K. Pandey, P. Kumar ve P. Pandey, Performance evaluation of effluent treatment plant for automobile industry, *International Journal of Energy and Environment (Print)*, 4, 2013. http://www.ijee.ieefoundation.org/vol4/issue6/IJEE_14_v4n6.pdf.
- [5] N. K. Salihoglu, S. Ucaroglu ve G. Salihoglu, Bioconversion of industrial wastes: paint sludge from automotive manufacturing, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20, 2100-2109, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10163-018-0764-z>.
- [6] C. W. Leitz, Life cycle cost modeling of automotive paint systems, 2007. <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/7582>.
- [7] S. Papisavva, S. Kia, J. Claya ve R. Gunther, Characterization of automotive paints: an environmental impact analysis, *Progress in organic coatings*, 43, no. 1-3, 193-206, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0300-9440\(01\)00182-5](https://doi.org/10.1016/S0300-9440(01)00182-5).
- [8] R. J. Orsato ve P. Wells, U-turn: the rise and demise of the automobile industry, *Journal of Cleaner Production*, 15, no. 11-12, 994-1006, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.05.019>.
- [9] M. H. Ordouei ve A. Elkamel, New composite sustainability indices for Cradle-to-Cradle process design: Case study on thinner recovery from waste paint in auto industries, *Journal of Cleaner Production*, 166, 253-262, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.247>.
- [10] Ö. Yavaş, Otomotiv endüstrisi kaynaklı atıkların pac ve demir koagülantı ile arıtılabilirlik ve işletme giderleri yönüyle karşılaştırılması, *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 4, no. 1, 33-40, 2021.
- [11] R. Wahaab, Assessment of automobile industry wastewater treatment units, *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 66, 770-776, 2001. <https://doi.org/10.1007/s001280075>.
- [12] R. P. Oliveira, J. A. Ghilardi, S. M. Ratusznei, J. A. D. Rodrigues, M. Zaiat ve E. Foresti, Anaerobic sequencing batch biofilm reactor applied to automobile industry wastewater treatment: volumetric loading rate and feed strategy effects, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47, no. 8, 1374-1383, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.06.014>.
- [13] M. Bajaj ve J. Winter, Biogas and biohydrogen production potential of high strength automobile industry wastewater during anaerobic degradation,

- Journal of environmental management, 128, 522-529, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.004>.
- [14] SKKY, Su Kirliliĝi Kontrolü Yönetmeliĝi, Resmi Gazete Sayısı, 25687, 2004.
- [15] E. Kuybu, Otomotiv endüstrisi atıksularının ters osmos yöntemiyle geri kazanımının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ University (Turkey), 2013.
- [16] E. GilPavas, K. Molina-Tirado ve M. Á. Gómez-García, Treatment of automotive industry oily wastewater by electrocoagulation: statistical optimization of the operational parameters, Water Science and Technology, 60, no. 10, 2581-2588, 2009. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.519>.
- [17] C. Consejo, M. Ormad, J. Sarasa ve J. Ovelleiro, Treatment of wastewater coming from painting processes: application of conventional and advanced oxidation technologies, Ozone: Science and Engineering, 27, no. 4, 279-286, 2005. <https://doi.org/10.1080/01919510591006274>.
- [18] A. Tatsi, A. Zouboulis, K. Matis ve P. Samaras, Coagulation-flocculation pretreatment of sanitary landfill leachates, Chemosphere, 53, no. 7, 737-744, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00513-7](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00513-7).
- [19] Ö. Y. Balık, Boya Endüstrisi Atıksuyunun Koagülasyon ile Ön Arıtımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013.
- [20] N. Dindar, Tekstil Endüstrisi Atıksularında İleri Arıtma Prosesleri Kullanılarak Organik Madde Giderimi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.
- [21] A. Gök, Tekstil Endüstrisi Atıksularının Elektro-Fenton Prosesi İle Arıtımı, Yüksek Lisans tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.
- [22] Z. Song, C. Williams ve R. Edyvean, Treatment of tannery wastewater by chemical coagulation, Desalination, 164, no. 3, 249-259, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(04\)00193-6](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(04)00193-6).
- [23] E. Çokay ve F. Şengül, Toksik Kirleticilerin İleri Oksidasyon Prosesleri İle Arıtımı, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 8, no. 2, 1-9, 2006.
- [24] S. Bingöl, Fenton ve Fenton Benzeri Proseslerle Azo Boyar Madde Giderimi Üzerine Bir Araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.
- [25] T. S, Foto-Fenton Prosesleri ile Arıtılabilirliğinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye, 2019.
- [26] D. Liang, N. Li, J. An, J. Ma, Y. Wu ve H. Liu, Fenton-based technologies as efficient advanced oxidation processes for microcystin-LR degradation, Science of the Total Environment, 753, 141809, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141809>.
- [27] Y. Uysal ve D. Yılcıoĝlu, Gaziantep OSB Atıksularından UV/H₂O₂ Fotooksidasyonu İle Renk Giderimi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19, no. 3, 129-134, 2016. <https://doi.org/10.17780/ksumbd.282329>.
- [28] H. Gürses, UV/Peroksit (UV/H₂O₂) Prosesi ile Atıksulardan Non-İyonik Yüzey Aktif Maddenin (NP-10) Uzaklaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü 2016.
- [29] E. Baştürk, Reaktif mavi 181 boyasının ileri oksidasyon yöntemlerinden UV/H₂O₂ prosesi ile giderilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.
- [30] M. Muruganandham ve M. Swaminathan, Photochemical oxidation of reactive azo dye with UV-H₂O₂ process, Dyes and pigments, 62, no. 3, 269-275, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2003.12.006>.
- [31] American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Rodger B. Baird, Andrew D. Eaton, Eugene W. Rice (Editors), Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition, Washington, D.C., American Public Health Association (APHA). 2017.
- [32] A. Birgül ve S. K. Akal Solmaz, Tekstil endüstrisi atıksulari üzerinde ileri oksidasyon ve kimyasal arıtma prosesleri kullanılarak KOI ve renk gideriminin araştırılması, Ekoloji, 16, no. 62, 72-80, 2007.
- [33] S. Meriç, D. Kaptan ve T. Ölmez, Color and COD removal from wastewater containing Reactive Black 5 using Fenton's oxidation process, Chemosphere, 54, no. 3, 435-441, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.08.010>.
- [34] S. G. Cetinkaya, M. H. Morcali, S. Akarsu, C. A. Ziba ve M. Dolaz, Comparison of classic Fenton with ultrasound Fenton processes on industrial textile wastewater, Sustainable Environment Research, 28, no. 4, 165-170, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2018.02.001>.
- [35] Ş. İrdemez, N. Demircioĝlu ve Y. Ş. Yıldız, The effects of pH on phosphate removal from wastewater by electrocoagulation with iron plate electrodes, Journal of hazardous materials, 137, no. 2, 1231-1235, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.04.019>.
- [36] J. Bratby, Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment. IWA publishing, 2016.
- [37] E. Sever, Meşrubat sanayi atıksularının arıtımında elektrokoagülasyon ve kimyasal koagülasyon yöntemlerinin değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, 2021.
- [38] A. F. A. Bakar ve A. A. Halim, Treatment of automotive wastewater by coagulation-flocculation using poly-aluminum chloride (PAC), ferric chloride (FeCl₃) and aluminum sulfate (alum), in AIP conference proceedings, 2013, vol. 1571, no. 1, pp. 524-529: American Institute of Physics.
- [39] S. G. Schrank, J. N. R. Dos Santos, D. S. Souza ve E. E. S. Souza, Decolourisation effects of Vat Green 01 textile dye and textile wastewater using H₂O₂/UV process, Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 186, no. 2-3, 125-129, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2006.08.001>.

- [40] T. Z. Pérez, G. Geissler ve F. Hernandez, Chemical oxygen demand reduction in coffee wastewater through chemical flocculation and advanced oxidation processes, *Journal of Environmental Sciences*, 19, no. 3, 300-305, 2007. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(07\)60049-7](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(07)60049-7).
- [41] N. Azbar, T. Yonar ve K. Kestioglu, Comparison of various advanced oxidation processes and chemical treatment methods for COD and color removal from a polyester and acetate fiber dyeing effluent, *Chemosphere*, 55, no. 1, 35-43, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.10.046>.
- [42] A. Assadi ve A. Eslami, Comparison of phenol photodegradation by UV/H₂O₂ and photo-fenton processes, *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 9, no. 6, 2010. DOI:10.30638/eemj.2010.107.
- [43] A. Aleboyeh, M. B. Kasiri ve H. Aleboyeh, Influence of dyeing auxiliaries on AB74 dye degradation by UV/H₂O₂ process, *Journal of environmental management*, 113, 426-431, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.10.008>.
- [44] A. Babuponnusami ve K. Muthukumar, A review on Fenton and improvements to the Fenton process for wastewater treatment, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2, no. 1, 557-572, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.10.011>.
- [45] F. Benitez, J. Acero, F. Real, F. Rubio ve A. Leal, The role of hydroxyl radicals for the decomposition of p-hydroxy phenylacetic acid in aqueous solutions, *Water Research*, 35, no. 5, 1338-1343, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00364-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00364-X).
- [46] S. Sahinkaya, A. Aygun ve M. F. Sevimli, The Application of Fe⁰/H₂O₂ for color removal, *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 1, 803, 2008.
- [47] Y. W. Kang ve K.-Y. Hwang, Effects of reaction conditions on the oxidation efficiency in the Fenton process, *Water research*, 34, no. 10, 2786-2790, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00388-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00388-7).
- [48] M. Karim, K. Aziz, K. Omer, Y. Salih, F. Mustafa, K. Rahman ve Y. Mohammad, "Degradation of aqueous organic dye pollutants by heterogeneous photo-assisted Fenton-like process using natural mineral activator: Parameter optimization and degradation kinetics," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 958, no. 1, p. 012011: IOP Publishing.
- [49] Y. A. Argun, Reaktif Mavi 114 boyasının Fenton prosesi ile giderimi, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.
- [50] D. Toprak, "Ultras-es-Fenton oksidasyon yöntemi ile acid blue 264 boyar maddesinin oksitlenerek renk gideriminin araştırılması," Fen Bilimleri Enstitüsü, 2015.
- [51] M. F. Gözükızı, Tekstil endüstrisi atıksularından fenton prosesi ve biyosorpsiyon yöntemi ile renk giderimi ve örnek tesis modeli, Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013.





Coğrafi bilgi sistemi ile hidroelektrik enerji üretimi amaçlı mini hidroelektrik santrali yeri seçimi: Sivas Kızılırmak Havzası örneği

Small hydroelectric power plant site selection for hydroelectric energy production with geographic information system: Sivas Kızılırmak Basin example

Sayiter Yıldız^{1,*} , Can Bülent Karakuş² , Firdevs Bayrak³ 

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas, Türkiye

² Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mimarlık, Güzel Sanatlar ve Tasarım Fakültesi, Şehir ve Bölge Planlama Bölümü, 58140, Sivas, Türkiye

³ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 58140, Sivas, Türkiye

Öz

Sanayileşme ile birlikte elektrik enerjisine olan talep sürekli artmaktadır. Ülkelerin enerjide dışa bağımlılığı azaltmasının yolu kendi enerjilerini üretmesinden geçer. Türkiye'nin kullanılabilir en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biri hidroelektrik enerjidir. Bu çalışmada, Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) tabanlı hidrolojik bir model kullanılarak Kızılırmak Havzası'nda teorik olarak belirlenen mini hidroelektrik santrallerinin (MHES) lokasyonları tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda, incelenen havzada kurulu güç potansiyeline göre 100-150 kWh arasında 151, 150-200 kWh arasında 19 ve 200-300 kWh arasında 13 yer tespit edildi. Çalışma, Kızılırmak havzası içerisinde teorik olarak hesaplanabilecek hidroelektrik potansiyelini destekler niteliktedir.

Anahtar kelimeler: Mini hidroelektrik santrali, Coğrafi bilgi sistemi, Yer seçimi

1 Giriş

21. yüzyılın başından bu yana küresel ekonominin sürekli büyümesi, dünya enerji talebini rekor seviyelere taşımıştır. Fosil yakıtlardan elde edilen termal enerji, ihtiyacının çoğunu (yaklaşık %79.68'i) sağlarken, uzun vadeli sürdürülebilirliğin olmayışı ve bu kaynakların sınırlı doğası, daha sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynakları arayışını teşvik etmektedir [1]. Enerji sektörünün ülkelerin ve bölgelerin ekonomik, sosyal, teknolojik ve çevresel kalkınmaları üzerinde önemli bir etkisi vardır [2].

Enerji de dışa bağımlılığını azaltmak ve sürdürülebilir bir kalkınma için yenilenebilir su kaynaklarının kullanımı oldukça önemlidir. Boşa akan suların ekonomiye kazandırılması, stratejik bir hedef haline gelmiştir [3]. Enerji üretim sistemleri içerisinde hidroelektrik santraller (HES) düşük işletme maliyeti, en uzun işletme ömrü ve yüksek verimi ile ön plana çıkmaktadır [4].

Bir havzada hidroelektrik potansiyeli olan alanların seçilmesi veya belirlenmesi amacıyla yapılan arama çalışmaları (klasik yöntemle) büyük maliyet ve zaman gerektirmektedir. Alanın belirlenmesi için gerekli maliyet, toplam proje maliyetinin %2-6'sı civarındadır. Bu sorunların

Abstract

With industrialization, the demand for electrical energy is constantly increasing. The way for countries to reduce their dependence on foreign energy is to produce their own energy. One of the most important renewable energy sources available in our country is hydroelectric energy. In this study, the locations of theoretically determined mini hydroelectric power plants (MHPP) in the Kızılırmak Basin were determined using a Geographic Information System (GIS)-based hydrological model. As a result of the study, 151 places between 100-150 kWh, 19 places between 150-200 kWh and 13 places between 200-300 kWh were determined according to the installed power potential in the basin examined. The study supports the theoretically calculated hydroelectric potential within the Kızılırmak basin.

Keywords: Small hydroelectric power plant, Geographic information system, Site selection

çözümü amacıyla son yıllarda hidroelektrik potansiyeli olan alanların belirlenmesi, zaman ve maliyetlerin düşürülmesi amacıyla farklı bilgisayar yazılım modelleri geliştirilmiştir. Bu yazılım modellerinden bazıları daha az veriyle çalışırken, diğer kısmı karmaşık veriler gerektirir. Bu programlardan elde edilen sonuçlar çok temel başlangıç tahminlerinden gelişmiş tahminlere kadar geniş bir ölçeği kapsamaktadır [5]. Bu yazılım modellerinden en öne çıkanlar coğrafi bilgi sistemi (CBS) tabanlı yazılımlardır.

CBS, vektör ve raster verilerinin belirli amaçlar için analiz edilmesi, toplanması, depolanması, işlenmesi, görüntülenmesi ve düzenlenmesi için etkili bir araçtır. Dolayısıyla CBS'nin kullanılması, enerji projeleri için uygun yerlerin seçilmesi [6], baraj yeri ve hidroelektrik santrali yer seçimi için potansiyel alanların hidrolojik analiz ve modelleme yoluyla değerlendirilmesinde de önemli bir rol oynayabilir [7]. Bu modeller genellikle belirli girdileri (yağış, sıcaklık vb.) model çıktısına (örneğin debi) bağlamak için matematiksel ve istatistiksel kavramları kullanır. Hidrolojik modellerin kullanımı, su kaynaklarının değerlendirilmesinde geleneksel yöntemlere göre üstün olmaları nedeniyle artmıştır [8].

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

Geliş / Received: 28.11.2023 Kabul / Accepted: 15.01.2024 Yayınlanma / Published: 15.04.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1397338

CBS ile baraj yeri ve hidroelektrik enerji santrali yer seçimi konusunda pek çok çalışma yapılmıştır. Tian ve ark., [9] elektrik santralleri için uygun sahaların belirlenmesi ve toplam potansiyeli hesaplamak amacıyla CBS yazılımı kullanmıştır. Bu yöntemin daha az zaman aldığı ve geleneksel tekniklere göre daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Fesalbon ve Blanco [10], CBS'den yararlanan çoklu teknikler kullanarak Marinduque adasında baraj yer seçimi için en uygun yerleri bulmak için bir metodoloji geliştirmiştir. Noori ve ark., [11] yapmış oldukları çalışmada baraj yeri uygunluk değerlendirmesi için iki farklı yaklaşım (bulanık mantık ve AHP) uygulamışlardır. Çalışmalarında, CBS araçlarının kullanılmasının baraj yeri seçimine karar vermenin etkili bir yolu olduğu sonucuna varmışlardır. Rahmati ve ark., [12] çalışmalarında, su havzaları içindeki kontrol barajları için uygun yerlerin seçimini belirlemek ve yönlendirmek için çok kriterli karar analizini CBS'ye entegre ederek, çoklu kritere ait çok sayıda konumsal verinin nispeten basit ve görsel olarak işlenmesine olanak sağlamıştır. Rane ve ark., [13] Hindistan'ın Ulhas nehri havzasında GBS kullanarak potansiyel baraj yeri seçimine yönelik bir karar çerçevesi belirlemiştir. Jafari ve ark., [14] ise Nehir Tipi hidroelektrik santral seçimi için CBS tabanlı bir yaklaşım ile bir model geliştirmiştir.

Genel olarak hidroelektrik santrallerin kurulu güce göre bir sınıflandırması bulunmamaktadır. Birçok ülke farklı kurulu güce göre hidroelektrik santralleri sınıflandırmıştır. Bu santraller genel olarak kurulu güce göre mikro (100 kW altında), mini (101-1000 kW arasında), küçük (1001-10000 kW arasında) ve büyük (10000 kW üzerinde) santraller şeklinde adlandırılır [15]. Bu çalışmada, Sivas il sınırları içerisinde bulunan Kızılırmak Havzasının mini hidroelektrik santrali (MHES) potansiyel alanlarının CBS tekniklerinden faydalanılarak belirlenmesi amaçlanmaktadır.

2 Materyal ve yöntem

2.1 Çalışma alanı

Sivas, Anadolu yarımadasının ortasında, İç Anadolu Bölgesi'nin Yukarı Kızılırmak bölümünde yer alır. 36° ve 39° doğu boylamları ile 38° ve 41° kuzey enlemleri arasında kalır. 28488 km²'lik yüzölçümü ile Türkiye'nin toprak bakımından Konya'dan sonra ikinci büyük ilidir. Sivas ilinin büyük bir kesimi yazları sıcak ve kurak, kışları soğuk ve karlı geçen karasal İç Anadolu ikliminin etkisinde kalmaktadır. Fakat kuzeyde Karadeniz, doğuda Doğu Anadolu yüksek bölge ikliminin etkileri bulunmaktadır [16].

Çalışma alanı, Sivas il sınırları içerisindeki Kızılırmak havzasını oluşturmaktadır. Kızılırmak havzası 82221 km²'lik alanı kapsamaktadır. Havzanın çevresi 3546 km, havzanın uzunluğu ise 293 km'dir. Sivas il sınırları içerisindeki Kızılırmak havzası 13416 km²'lik alanı kapsamaktadır. Bu sınırı oluşturan havzanın çevresi 658.30 km'dir (Şekil 1).

Kızılırmak Havzası'nın ortalama yağış değeri 435.60 mm, ortalama sıcaklığı 10.5 °C'dir. Havzanın geniş olmasından dolayı iklim tiplerinde farklılık görüldüğü gibi buharlaşma değerleri de havza içinde farklılık göstermektedir. Kızılırmak İmranlı'da Kızıldağ'dan doğarak birçok derenin birleşmesiyle oluşur. Kızıldağ isminden

anlaşılabileceği gibi Kızılırmak Nehri ismini kırmızı toprak yapısından almaktadır. Havzadaki litolojik birimlerin ve kayaç birimlerinin rengi kızıl olduğundan, erozyonla nehre akan malzemeler nehre kızıl rengini vermektedir.

Havzadaki en büyük arazi kullanımlarını tarım alanları, verimli orman alanları ve bozuk orman alanları oluşturmaktadır. Kızılırmak Havzası içinde yer alan büyük toprak grupları değerlendirildiğinde; kahverengi topraklar, kahverengi orman toprakları ve kırmızımsı kahverengi topraklar havzada en fazla dağılım gösteren toprak gruplarıdır [17].

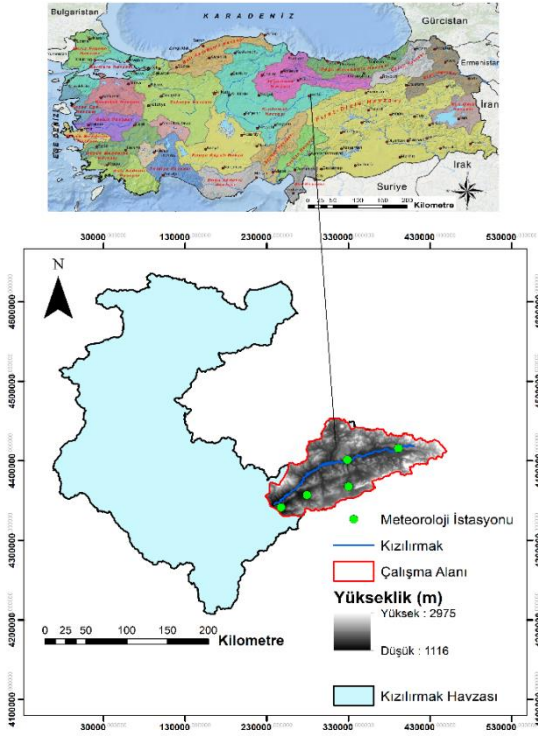
2.2 Veri temini ve yazılım

Bu çalışmada; Sivas il sınırı içerisinde yer alan Kızılırmak Havzası'ndaki MHES'nin en uygun yerlerinin belirlenebilmesi için Şekil 2'de verilmiş olan temel veriler (Sayısal Yükseklik Modeli ve meteorolojik veriler) kullanılmıştır. Çalışma kapsamında yapılmış olan tüm analizler için ArcGIS 10.8 yazılımı kullanılmıştır.

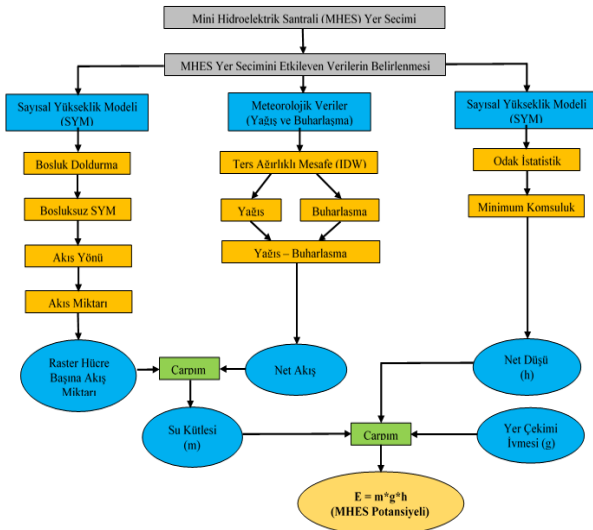
MHES için gerekli olan potansiyel enerji hesabındaki önemli bileşenler olan akış miktarı ve net düşü (kot farkı) kriterleri, Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırma Kurumu (USGS)'nin web sitesinden [18] temin edilmiş olan 30 m çözünürlüklü Sayısal Yükseklik Modeli'nden (SYM) elde edilmiştir. MHES için gerekli olan bir diğer önemli kriter olan net akış miktarını belirlemek için çalışma alanına ait yağış ve buharlaşma verileri kullanılmıştır. Çalışma alanına ait yıllık ortalama yağış ve buharlaşma kriterlerini belirlemek için öncelikle çalışma alanının 2000-2019 yılları arasındaki yıllık ortalama yağış ve buharlaşma verileri Meteoroloji Müdürlüğü'nden (Sivas/Türkiye) Excel (.xlsx) formatında temin edilmiştir. Bu yağış ve buharlaşma verileri, ArcGIS 10.8 yazılımında yer alan IDW (Ters Ağırlıklı Mesafe) aracı vasıtasıyla haritalandırılarak 20 yıllık zaman periyoduna ait yağış ve buharlaşma kriteri verileri elde edilmiştir. Temin edilmiş olan tüm veriler, ön işleme tabii tutulduktan sonra ortak bir harita projeksiyonu (UTM 37N, ED50) ve veri formatına dönüştürülerek hücre büyüklüğü 10m x 10m boyutuna sahip raster veri formatı şeklinde depolanmıştır.

2.3 Yöntem

Bu araştırmanın metodolojisi, hidroelektrik güç potansiyelini değerlendirmek için CBS tabanlı bir hidrolojik modele dayanmaktadır. Bu model, SYM ile birlikte yağış ve buharlaşma verilerini kullanarak MHES açısından en uygun yerleri ortaya koymaktadır [19-22]. Çalışmada uygulanacak olan yöntemin akış diyagramı Şekil 2'de görülmektedir. Bu çalışmada uygulanan yöntem genel olarak 4 aşamadan oluşmaktadır. Bunlar: (i) veri temini, (ii) verilerin CBS veri formatına dönüştürülmesi, (iii) Potansiyel enerji formülüne ($E = mgh$) dayalı olarak MHES yeri açısından en uygun alanların belirlenmesi, (iv) MHES yeri açısından en uygun noktasal lokasyonların belirlenmesi. Şekil 2'de görülen yöntemin aşamaları aşağıdaki bölümlerde detaylı bir şekilde açıklanmıştır.



Şekil 1. Türkiye havzaları ve çalışma alanı lokasyonu



Şekil 2. Çalışmada kullanılan yöntemin akış diyagramı

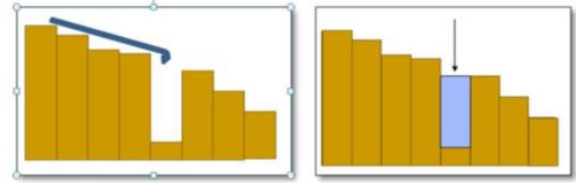
2.3.1 Akış miktarı haritalaması

Aşağı yönlü eğimli hücreye akan tüm hücrelerin toplam akışı, akış birikim fonksiyonu kullanılarak hesaplanabilmektedir. Hidrolojik modellemenin ilk aşaması akış miktarının belirlenmesi olup, hidrolojik modelleme için de ArcGIS 10.8 yazılımının hidroloji (ArcHydro) modülü kullanılmaktadır. Bu modül yardımıyla SYM verisi üzerinde öncelikli olarak boşluk doldurma, akış yönü belirleme ve akış birikiminin hesaplanması gibi işlemler gerçekleştirilerek akış miktarı verisi elde edilebilmektedir [20, 23-24]. Akış miktarı, yağış suyunun aktığı veya toplanmasına katkıda bulunan alanın bir değerini

gösterdiğinden her aşağı eğimli hücreye akan tüm hücrelerin birikmiş akışını belirlemek için akış biriktirme raster haritalaması kullanılmaktadır. Daha yüksek akış birikim değerlerine sahip alanlar büyük olasılıkla akarsular, nehirler, göletler veya diğer su kütleleridir [25]. Daha koyu sembollere sahip akış birikimi raster haritası yüksek akış birikimi değerlerini temsil ederken, daha açık semboller düşük akış birikimi değerlerini temsil etmektedir [24]. Raster hücre başına akım miktarının belirlenebilmesi için sırasıyla izlenmesi gereken aşamalar aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

2.3.1.1 Boşluk doldurma

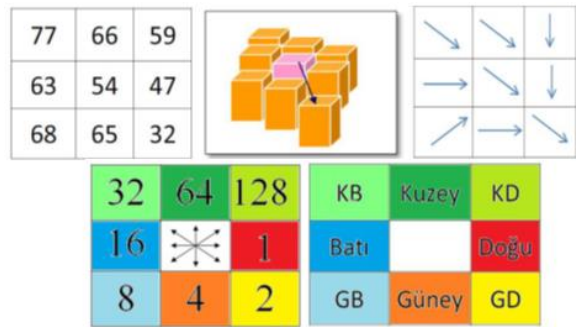
Toplam akış miktarını hesaplamının ilk aşaması SYM'de yer alan boşlukların doldurulmasıdır. Boşlukları doldurma işlemi, belirli bir alandaki havzaların ve derelerin doğru bir şekilde çizilmesini sağlamak için gereklidir [19]. Sağlıklı bir yüzey akışının gerçekleşebilmesi için yükseklik değeri yüksek olan hücre ile yükseklik değeri az olan hücre arasında boşluk olmaması gerekmektedir (Şekil 3) [26].



Şekil 3. SYM veride oluşabilecek boşluklar ve doldurulması [27]

2.3.1.2 Akım yönü belirleme

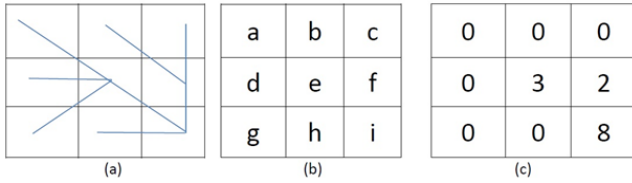
Bu fonksiyon, verilen grid sistemi için akım yönünü hesaplamaktadır. Hücrede yer alan değer, bu hücreye komşu 8 hücreden yükseklik değeri en az olana doğru su akım yönünü göstermektedir. Şekil 4'te görüldüğü gibi her bir grid içerisinde yükseklik değeri yer almakta ve su akışı en düşük yükseklik değerine sahip gride doğru olmaktadır [28]. Akış yönü raster haritası, daha yüksek kottaki hücrelerin her birinden suyun dışarı akacağı yönü göstermektedir [24]. Model için girdi bir yüzey taramadır ve elde edilen çıktının sonucu her hücreye 8-128 arasında değişen değerler vererek akış yönünü gösteren bir taramadır. Burada her değer tek bir yönü gösterir. Doğrudan akış veri seti ile birlikte akış yönü hesaplamasının çıktısı, ArcGIS yazılımının akış birikiminin hesaplanması için girdi verileri olarak işlev görmektedir [29].



Şekil 4. Hücrelerdeki akım yönü [28]

2.3.1.3 Kümülatif akım hesaplama

Kümülatif akım hesaplamasının temeli, su toplama alanındaki hücre sayılarının hesaplanmasına dayanmaktadır. Bu yöntem ile su toplama alanı ve nehir kolları belirlenebilmektedir. Hücreler arasındaki su akışına bağlı olarak su akışının hiç gerçekleşmediği hücreler “0” sayısal değerini almaktadır. Herhangi bir hücreye komşu hücrelerden su akışı gerçekleşmesi durumunda o hücreye girecek sayısal değer o hücreye su akışı olan hücre sayısına eşittir. Şekil 5’e göre; “0” sayısal değeri alan hücreler kendilerine doğru hiçbir hücreden su akışının olmadığını; “2” ve “3” sayısal değerini alan hücreler kendilerine doğru sırasıyla 2 ve 3 hücreden akış gerçekleştiğini göstermektedir “8” sayısal değeri alan hücre ise en düşük kot değerine sahip hücre olup tüm hücrelerdeki (8 hücre) su akışı bu hücreye doğru olmaktadır. Bu şekilde hücreler arası su akışları (Şekil 5) dikkate alınarak su toplama alanındaki hücre sayıları ortaya konulabilmektedir [28]. Daha yüksek akış birikim değerleri içeren hücreler aslında belirli bir alandaki çukurları temsil ederken düşük birikim değerlerine sahip hücreler ise zirveleri temsil etmektedir [29]. Boşlukları doldurulmuş SYM dizinizdeki her bir hücreye akan hücre sayısını belirler. Su daha yüksek değerlere sahip alanlarda birikir ve boşalır [30].



Şekil 5. Kümülatif akım yönü [28]

2.3.2 Net akış ve su kütlesi haritalaması

Yıllık ortalama yağış ve buharlaşma verileri arasındaki fark net akış miktarını ortaya koymaktadır. Inverse Weighted Distance (IDW) (Ters Ağırlıklı Mesafe) yöntemi vasıtasıyla yağış ve buharlaşma değerlerine ait tematik haritalar elde edilebilmektedir [31]. Yöntem; bilinen örnek noktalara ait değerlerin yardımıyla örneklenmeyen noktalara ait hücre değerlerinin belirlenmesi için kullanılan bir enterpolasyon tekniğidir. İlgili hücreden uzaklaşan çeşitli noktalar gözetilerek ve mesafedeki artışa bağlı olarak hücre değeri hesap edilir. Tahmin edilen değerler, komşu civardaki noktaların uzaklığı ve büyüklüğünün bir fonksiyonu olup, mesafenin artması ile tahmini yapılacak hücre üzerindeki önem ve etki azalır [32]. Bu yöntem, örneklem nokta verilerinden enterpolasyonla grid üretmede çoğunlukla tercih edilen bir yöntemdir. IDW enterpolasyon tekniği enterpole edilecek yüzeyde yakındaki noktaların uzaktaki noktalarda daha fazla ağırlığa sahip olması esasına dayandırılmıştır. Bu teknik enterpole edilecek noktadan uzaklaştıkça ağırlığı da azaltan ve örneklem noktalarının ağırlıklı ortalamasına göre bir yüzey enterpolasyonu yapar [33]. IDW Denklem 1 ile ifade edilmektedir [34]:

$$Z(X_0) = \frac{\sum_{i=1}^n Z(X_i) \cdot d_{i0}^{-r}}{\sum_{i=1}^n d_{i0}^{-r}} \quad (1)$$

Burada, tahminlerin yapıldığı X_0 lokasyonu, komşu ölçümleri n 'nin bir fonksiyonudur [$Z(X_i)$ ve $i=1,2,\dots,n$]; r gözlemlerin her birinin atanmış ağırlığını belirleyen üstür ve d gözlem lokasyonu X_i ile tahmin lokasyonu X_0 'ı ayıran mesafedir. \bar{U} büyüdükçe, tahmin lokasyonundan uzak mesafedeki gözlemlerin atanmış ağırlığı küçülür. \bar{U} 'sün artması, tahminlerin en yakındaki gözlemlere çok benzediğini gösterir [35]. ArcGIS yazılımının Mekânsal Analiz aracıyla yer alan Raster Calculator (Raster Hesaplayıcı) yardımıyla buharlaşma kriterine ait raster harita yağış kriterine ait raster haritadan çıkarılarak net akışa ait raster harita elde edilebilmektedir [31].

Havzanın toplam akım değerlerini gösteren raster harita ile net akışı gösteren raster harita, ArcGIS yazılımının Mekânsal Analiz aracıyla yer alan Raster Calculator (Raster Hesaplayıcı) yardımıyla çarpılarak akarsuların piksel bazında taşıdığı su kütlesine ait raster harita elde edilebilmektedir [29, 36].

2.3.3 Net düşü (h) haritalaması

Sayısal yükseklik verilerine “Odak İstatistik” fonksiyonu uygulanmaktadır. Bu fonksiyon, her bir hücreyi çevreleyen komşu hücreler için gerekli istatistikleri (yani minimum, maksimum, tüm değerlerin toplamı) hesaplayan bir fonksiyondur. Çağdaş analizde minimum fonksiyon, her raster hücrenin etrafındaki minimum hücreleri (en alttaki komşu hücreler) bulmak için kullanılan, her hücrenin etrafında 3x3 boyutunda hücre içeren bir dikdörtgene uygulanmaktadır. Her bir hücrenin minimum komşularına olan yükseklik düşüşünü bulmak için SYM kullanılır. Piksellerden alınan yükseklik değerleri “Odak İstatistik” metodu ile CBS yazılımlarında işlenerek bir pikselin çevresindeki komşu piksellerdeki yükseklik farkı hesaplanabilmektedir [37]. Elde edilen çıktı, daha sonra potansiyel enerjiyi hesaplamak için denklemde kullanılan net düşü (kot farkı) değeridir [20, 29, 38]. Net düşü haritalaması, ArcGIS yazılımının mekansal analiz aracıyla yer alan “Odak İstatistik” aracı yardımıyla 30 m mekansal çözünürlüğe sahip SYM kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir [39, 40]. Bu yöntem, nehir yatağı topoğrafyasını ve olası potansiyel yük konumlarını belirlemek için uygun bir metottur [41].

2.3.4 CBS tabanlı MHES potansiyeli haritalaması

Hidroelektrik üretkenliği, suyun mevcudiyetine (mevsimlere ve yıllara göre değişen akarsu akışıyla verilir) ve hidrolik yüke (türbin devresinin girişindeki ve çıkışındaki su seviyeleri arasındaki dikey mesafe) bağlıdır. Potansiyel yerçekimi enerjisi; suyun kütlesine, yerçekimi ivmesine ve hidrolik yüke (net düşü) bağlı olup bu kriterler tüm hidroelektrik tasarım kriterlerinin temelini oluşturmaktadır [42].

CBS'ye dayalı birçok özel araç, hidroelektrik santrali gibi yenilenebilir enerji tesislerinin potansiyel değerlendirilmesi için son yıllarda yaygın kullanım alanı bulmuştur. CBS tabanlı bu araçlar, hidroelektrik potansiyel değerlendirilmesi için tüm dünyadaki nehir havzalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [43]. SYM ve CBS'ye dayalı modellerin hidroelektrik santraller için potansiyel yerlerin belirlenmesinde çok uygun ve hızlı çözümler üretmektedir

[44]. Nitekim Cuya ve ark., [45] yeni nesil CBS yazılımlarının ve dijital SYM'lerin kullanılabilirliği ile nehir ağı, nehir ve arazi eğimleri, hidrolik yük gibi arazi özelliklerinin SYM'den elde edilmesinin daha kolay ve güvenilir olduğunu ifade etmiştir.

Yukarıdaki bilgiler doğrultusunda elde edilmiş olan su kütlesi (m) ve net düşü (h) kriterlerine ait raster haritalar ile yerçekimi ivmesi (g) değeri, aşağıdaki denklemde verilen potansiyel enerji (E) formülüne göre birbiriyle çarpılarak MHES potansiyeli elde edilebilmektedir [19, 46].

$$E = m * g * h \quad (2)$$

Burada; m = Su Kütlesi, h = Net Düşü (m), g = Yerçekimi ivmesi (9,81 m/s²)

ArcGIS yazılımındaki Raster Calculator (Raster Hesaplayıcı) aracı yardımıyla yukarıdaki denkleme göre potansiyel enerjiye ait MHES uygunluk haritası üretilmiştir. Alansal olarak elde edilmiş olan MHES uygunluk haritası, ilgili yazılımın Mekansal Analiz (Spatial Analysis) aracında yer alan "Raster to Point" aracı ile değerlendirilerek noktasal MHES uygunluk haritasına dönüştürülmüştür. Bu işlem sonucunda MHES potansiyelinin lokasyonları noktasal olarak belirlenmiştir.

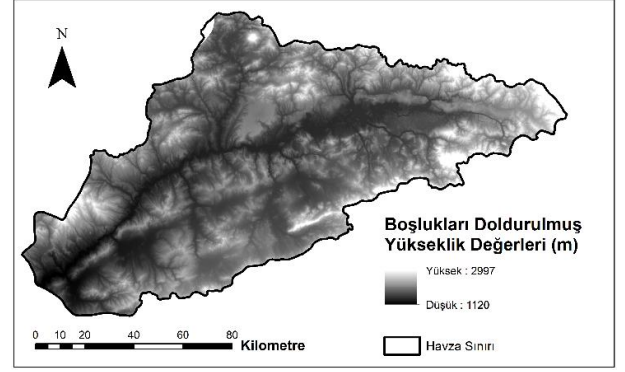
3 Bulgular ve tartışma

3.1 Hidrolojik modelleme ile akış miktarının belirlenmesi

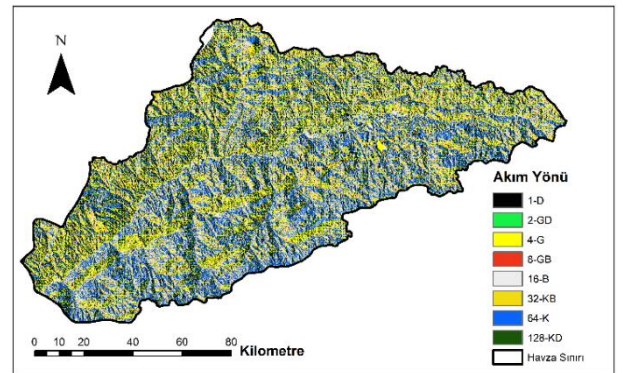
Çalışma alanının yüksekliği 1120 m – 2997 m arasında değişmektedir (Şekil 1). Doğru bir yüzey akışı sağlanmanın temeli, hidrolojik modellemeye dayalı olarak akış miktarının belirlenmesine dayanmaktadır. Bu işlem için öncelikli olarak çalışma alanının yükseklik değerlerine bağlı olarak "SYM yenileme" ve "boşlukları doldurma" işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler yardımıyla SYM verisinde yer alan düşük kotlardaki hatalı hücrelerin yükseklik değerleri düzeltilmiştir (Şekil 6). Şekil 6 yardımıyla, ArcHydro modülünde yer alan "akım yönü belirleme" aracı kullanılarak akım yönleri belirlenmiştir (Şekil 7).

Akış yönü, ArcGIS 10.8 yazılımı yardımıyla SYM kullanılarak her bir hücreden en dik inişin yönü bulunarak belirlenmiştir. Akış yönünü gösteren raster harita (Şekil 7), yükseklik değerlerini gösteren raster haritanın her bir hücresinden suyun dışarı akacağı yönü göstermektedir. Yağış suyunun aktığı veya toplandığı alanın bir değerini gösterdiğinden, her aşağı eğimli hücreye akan tüm hücrelerin birikmiş akışını belirlemek için akış biriktirme raster haritası kullanılmıştır [25]. Bu, su akışının tüm yıl boyunca belirli bir minimumun üzerinde olabileceği akarsuların belirlenmesine yardımcı olur [24].

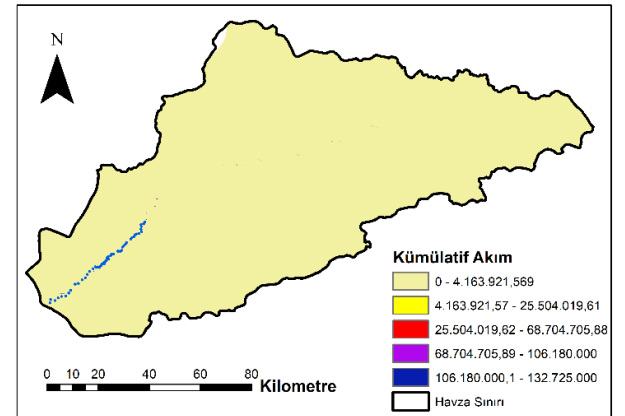
Şekil 7'ye göre; akış yönü yoğunluğu kuzeydoğudan (KD) itibaren doğu (D) yönüne doğru azalmaktadır. "Kümülatif akım hesaplama" işlemi Şekil 7'ye göre yapılmış olup koyu mavi renkli noktalar su toplama alanlarını göstermektedir. Koyu mavi renge sahip noktalar yüksek akış birikme değerlerini, açık krem rengine sahip noktalar ise düşük akış birikme değerlerini temsil etmektedir (Şekil 8).



Şekil 6. Çalışma alanına ait boşlukları doldurulmuş yükseklik haritası



Şekil 7. Çalışma alanına ait akım yönü haritası

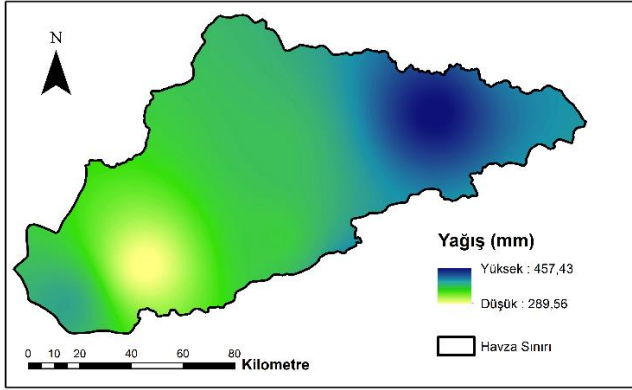


Şekil 8. Çalışma alanına ait kümülatif akım haritası

3.2 Net akış haritalaması

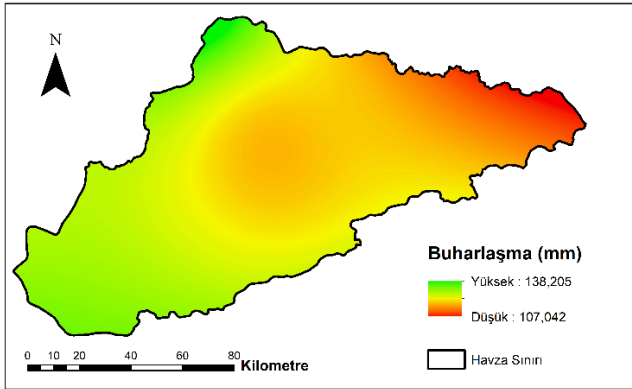
Çalışma alanına net akış haritasının oluşturulması için öncelikli olarak yağış ve buharlaşma haritaları oluşturulmuştur. Yağış haritasının oluşturulması için ArcGIS 10.8 yazılımında yer alan IDW yöntemi kullanılmıştır. 2000-2019 yılları arasındaki 20 yıllık ortalama toplam yağış verileri kullanılarak çalışma alanı için belirlenen yöntemle oluşturulmuş olan yağış haritasına (Şekil 8) göre yıllık ortalama yağış değerleri 289.56 mm ile 457.43 mm arasında değişmektedir. Yağışın en yüksek olduğu bölgeler çalışma alanının kuzeydoğusunda bulunmaktadır. Yağışın en düşük olduğu alanlar ise çalışma

alanının güneybatısında bulunmaktadır (Şekil 9). Çalışma alanında yoğun yağış alan bölgeler, MHES yeri uygunluğu açısından en uygun bölgeler sınıfında kabul edilmektedir.



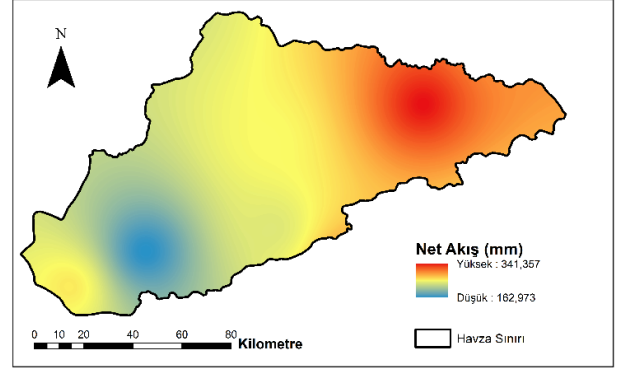
Şekil 9. Çalışma alanına ait yağış dağılım haritası

2000-2019 yılları arasındaki 20 yıllık ortalama buharlaşma verileri kullanılarak çalışma alanı için belirtilen yöntemle oluşturulmuş olan buharlaşma haritasına (Şekil 10) göre yıllık ortalama buharlaşma değerleri 107.04 mm ile 138.20 mm arasında değişmektedir. Buharlaşmanın en yüksek olduğu bölgeler çalışma alanının kuzeyinde bulunmaktadır. Buharlaşmanın en düşük olduğu alanlar ise çalışma alanının doğusunda bulunmaktadır (Şekil 10). Yağış faktörüne de bağlı olarak buharlaşmanın en düşük olduğu bölgeler, MHES yeri uygunluğu açısından en uygun bölgeler sınıfında kabul edilmektedir.



Şekil 10. Çalışma alanına ait buharlaşma dağılım haritası

Buharlaşma kriterine ait oluşturulmuş olan buharlaşma dağılım haritası (Şekil 10), ArcGIS 10.8 yazılımının Mekansal Analiz (Spatial Analys) aracında yer alan Raster Calculator (Raster Hesaplayıcı) yardımıyla yağış kriterine ait oluşturulmuş olan yağış dağılım haritasından (Şekil 9) çıkarılarak çalışma alanındaki net akışı gösteren dağılım haritası elde edilmiştir (Şekil 11). Şekil 11'e göre; net akış değerleri 162.97 mm ile 341.35 mm arasında değişmektedir. Net akışın en yoğun olduğu bölgeler genel olarak çalışma alanının doğusunda yoğunlaşmıştır. Net akışın en düşük olduğu bölgeler ise çalışma alanının güneybatısında yer almıştır.

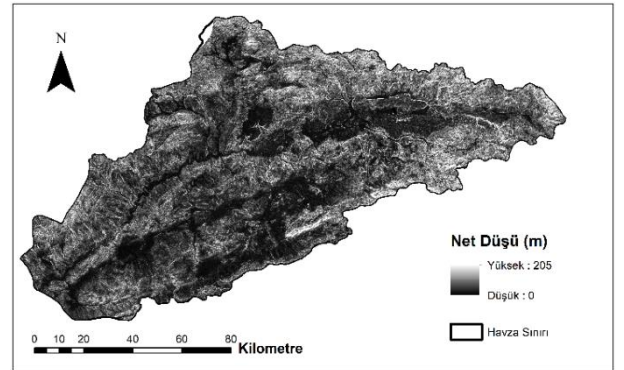


Şekil 11. Çalışma alanına ait net akış haritası

3.3 Net düşü haritalaması

Bir hidroelektrik santralının temel amacı, belirli bir yükseklikten (net düşü) akan bir su kütlesinin potansiyel enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmektir. Bu mekanizmaya göre elde edilen güç çıkışı, akış ve net düşü ile doğru orantılıdır [47]. Nehrin her noktasında hidroelektrik gücü sağlamak için SYM'den elde edilen akarsuyun hidrolik yüksekliği (net düşü) ve deşarj akışı gereklidir. Net düşü için en önemli faktör, havzanın topografyası, su girişinin ve türbinin konumudur. Net düşü, nehrin yukarıdaki ve aşağıdaki iki nokta arasındaki yükseklik farkıdır [48]. SYM'ye göre iki nokta arasındaki yükseklik farkının fazla olduğu (alanın eğiminin yüksek olduğu) her yerde düşü hidroliği miktarı fazladır. Bu nedenle de potansiyel enerji formülüne göre de potansiyel enerji miktarı fazladır [49].

Çalışma alanı için Odak İstatistik yöntemi ile oluşturulmuş olan net düşü haritası Şekil 12'de görülmektedir. Şekil 12'ye göre çalışma alanındaki yükseklik farkı (net düşü) 0 ile 205 m arasında değişmektedir. Bu net düşü değeri, yüksek net düşü sınıfında yer almaktadır [47].

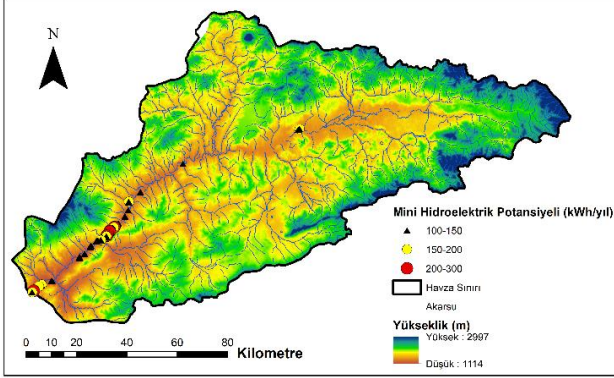


Şekil 12. Çalışma alanına ait net düşü haritası

3.4 MHES potansiyeli haritalaması

Çalışma alanı için MHES potansiyelinin sonuçları Şekil 13'te gösterilmektedir ve MHES noktaları genel olarak çalışma alanının güneybatısında yer almıştır. Bu haritada siyah üçgen şekilleri, kırmızı ve sarı dairesel şekiller suyun esas olarak nerede biriktiğini ve dolayısıyla yüksek potansiyelle sahip raster hücrelerin nerede bulunabileceğini göstermektedir. Tüm hücrelerin tahmini güç potansiyeli, çalışma alanının toplam güç potansiyelinin tahmin

edilmesinde kullanılabilir. MHES potansiyeli açısından en yoğun noktalar, kümülatif akım değerlerinin yüksek olduğu ve su toplanma noktalarının belirlendiği bölgelerde (Şekil 8) yoğunlaşmıştır ve bu noktalar daha çok Kızılırmak nehrinin ana kolu üzerinde yer almıştır (Şekil 13).



Şekil 13. Çalışma alanına ait MHES potansiyeli haritası

Çalışma alanındaki MHES potansiyeli 100-300 kWh/yıl aralığında değişmektedir. Bu MHES potansiyeli 3 sınıflı olarak değerlendirildiğinde Tablo 1'de verilmiş olan MHES potansiyellerinin çalışma alanındaki sayıları ortaya konulmuştur. Çalışma alanında en fazla potansiyeli olan MHES sınıfı 100-150 kWh/yıl aralığındaki sınıf olup bu MHES sınıfının çalışma alanında belirlenmiş olan sayısı 151'dir. 150-200 ve 200-300 kWh/yıl aralığındaki MHES sınıflarının çalışma alanında belirlenmiş olan sayıları ise sırasıyla 19 ve 13'tür.

Tablo 1. MHES potansiyeli ve sayıları

MHES Potansiyeli (kWh/yıl)	MHES Sayısı
100-150	151
150-200	19
200-300	13

Tablo 1'e göre havzadaki en büyük potansiyel enerji kurulu gücü 200-300 kWh/yıl olup, bu aralıktaki MHES potansiyelinin 13 noktada üretilebileceği görülmektedir. Bu noktaların ve diğer tüm MHES potansiyellerinin büyük çoğunluğu Kızılırmak nehrinin ana kolu üzerinde yer almıştır. Havzanın üst kısımlarında ve Kızılırmak nehrinin yan kollarında su akış miktarı az ve çok kısa süreli olacağından dolayı bu bölgelerde tespit edilmiş olan MHES noktalarında enerji potansiyeli düşük olacaktır [31].

4 Sonuçlar

Bu çalışma, Sivas il sınırları içerisinde bulunan Kızılırmak Havzası içerisindeki MHES'lerin en uygun yerlerini CBS yardımıyla ortaya koymaktadır. MHES potansiyelinin en yüksek olduğu noktaların Kızılırmak nehrinin ana kolu üzerinde yer aldığı tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda, kurulu güç potansiyeline göre 100-150 kWh arasında 151 adet, 150-200 kWh arasında 19 adet ve 200-300 kWh arasında 13 adet olmak üzere toplam 183 adet MHES için yer tespit edilmiştir. Bu çalışma, bu havza içerisinde teorik olarak hesaplanabilecek hidroelektrik

potansiyelini destekler nitelikte bir çalışmadır. Bu çalışmanın sonuçları, su ve enerji konusunda faaliyet gösteren karar vericiler ve ilgili kamu kurum-kuruluşları için referans veri niteliği taşımaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 17

Kaynaklar

- [1] F. Chien, C. N. Wang, V. T. Nguyen, V. T. Nguyen and K. Y. Chau, An evaluation model of quantitative and qualitative fuzzy multi-criteria decision-making approach for hydroelectric plant location selection. *Energies*, 13(11), 2783, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13112783>.
- [2] S. M. Hosseini, A. Aslani and A. Kasaeian, Energy, water, and environmental impacts assessment of electricity generation in Iran. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102193, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102193>.
- [3] R. Bakış, S. Göncü, E. Gümüşlüoğlu, Nehil çayı havzasının analizi ve hidroelektrik enerji potansiyeli. *Anadolu University of Sciences & Technology-A: Applied Sciences & Engineering*, 14(1), 1-28, 2013.
- [4] F. Oral, R. Behçet, K. Aykut, Hidroelektrik santral rezervuar verilerinin enerji üretimi amaçlı değerlendirilmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2), 29-38, 2017. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.308545>.
- [5] R. Bakış, C. Koc, Y. Bayazıt and S. N. Cabuk, Application of geographic information system to select dam location for hydropower. *International Journal of Sustainable Energy and Environmental Research*, 2020. <https://doi.org/10.18488/journal.13.2020.91.56.72>
- [6] Z. Defne, K. A. Haas and H. Fritz, GIS based multi-criteria assessment of tidal stream power potential: A case study for Georgia, USA. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2310-2321, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.005>.
- [7] A. Rasooli, and D. Kang, Assessment of potential dam sites in the Kabul river basin using GIS. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 6(2), 83-89, 2015.
- [8] B. C. Kusre, D. C. Baruah, P. K. Bordoloi and S. C. Patra, Assessment of hydropower potential using GIS and hydrological modeling technique in Kopili River basin in Assam (India). *Applied Energy*, 87(1), 298-309, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.07.019>.
- [9] Y. Tian, F. Zhang, Z. Yuan, Z. Che, N. Zafetti, Assessment power generation potential of small hydropower plants using GIS software. *Energy Reports*, 6, 1393-1404, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.05.023>.
- [10] R. M. A. Fesalbon, A. C. Blanco, Hydropower dam site selection and visualization using GIS and RS techniques: A case of Marinduque, Philippines. *The*

- International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 42, 207-214, 2019. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W19-207-2019>.
- [11] A. M. Noori, B. Pradhan and Q. M. Ajaj, Dam site suitability assessment at the Greater Zab River in northern Iraq using remote sensing data and GIS. *Journal of Hydrology*, 574, 964-979, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.001>.
- [12] O. Rahmati, Z. Kalantari, M. Samadi, E. Uuemaa, D. D. Moghaddam, O. A. Nalivan, & D. Tien Bui, GIS-based site selection for check dams in watersheds: considering geomorphometric and topo-hydrological factors. *Sustainability*, 11(20), 5639, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11205639>.
- [13] N. L. Rane, A. Achari, S. P. Choudhary, S. K. Mallick, C. B. Pande, A. Srivastava, K. N. Moharir, A decision framework for potential dam site selection using GIS, MIF and TOPSIS in Ulhas river basin, India. *Journal of Cleaner Production*, 423, 138890, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138890>.
- [14] M. Jafari, R. Fazloulou, M. Effati, A. Jamali, Providing a GIS-based framework for Run-Of-River hydropower site selection: A model based on sustainable development energy approach. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 38(2), 102-126, 2021. <https://doi.org/10.1080/10286608.2021.1893310>.
- [15] M. T. Özdemir, A. Orhan ve M. Cebeci, Çok küçük hidrolik potansiyellerin enerji üretim amacı ile yerel imkanlarla değerlendirilmesi. *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu, Fırat Üniversitesi, sayfa 5-7, Elazığ, Türkiye, 5-7 Ekim 2011*.
- [16] C. B. Karakuş ve S. Yıldız, Hava kalite indeksi ile meteorolojik parametreler arasındaki ilişkinin çoklu regresyon yöntemi ile belirlenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(2), 698-711, 2019. <https://doi.org/10.28948/ngumu.598118>.
- [17] SYGM, Kızılırmak Havzası Taşkın Yönetim Planı, Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Mayıs 2019, s.99, Ankara. 2019.
- [18] <https://earthexplorer.usgs.gov>. Erişim tarihi 10 Nisan 2023.
- [19] B. Feizizadeh and E. M. Haslauer, GIS-based procedures of hydropower potential for Tabriz basin, Iran. *International Journal*, 495-502, 2012.
- [20] C. Koç, Y. Bayazit, S. Y. Özgül, Investigation of theoretical hydroelectric potential with GIS-based model in Büyük Menderes Basin, Turkey. *International Journal of Sustainable Energy*, 41(11), 2185-2196, 2022. <https://doi.org/10.1080/14786451.2022.2147525>.
- [21] N. Wegner, E. Mercante, I. de Souza Mendes, D. Ganascini, M. M. Correa, M. F. Maggi, and J. A. C. Siqueira, Hydro energy potential considering environmental variables and water availability in Paraná Hydrographic Basin 3. *Journal of Hydrology*, 580, 124-183, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124183>.
- [22] D. Connolly, MacLaughlin, S., & Leahy, M. Development of a computer program to locate potential sites for pumped hydroelectric energy storage. *Energy*, 35(1), 375-381, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.10.004>.
- [23] I. Torre Franca, R. E. Otadoy and A. Tongco, Incorporating landscape dynamics in small-scale hydropower site location using a GIS and spatial analysis tool: the case of Bohol, Central Philippines. *Energies*, 15(3), 1130, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15031130>.
- [24] C. Odiji, M. Adepoju, I. Ibrahim, O. Adedeji, I. Nnaemeka and O. Aderoju, Small hydropower dam site suitability modelling in upper Benue river watershed, Nigeria. *Applied Water Science*, 11, 1-17, 2021. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01466-6>.
- [25] A. Korkovelos, D. Mentis, S. H. Siyal, C. Arderne, H. Rogner, M. Bazilian, M. Howells, H. Beck, A. De Roo, A geospatial assessment of small-scale hydropower potential in sub-saharan Africa. *Energies*, 11(11), 2018. <https://doi.org/10.3390/en11113100>.
- [26] A. A. Karadağ, Kovada Gölü alt havza sınırlarının belirlenmesi. *Düzce Üniversitesi Ormancılık Dergisi*, 8(1), 58-76. 2012.
- [27] N. G. Ayhan, K. Seyrek, A.H. Sargın, Coğrafi Bilgi Sistemleri ile hidroloji uygulamaları. *Kurs Notları. İşlem Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Eğitim Ltd. Şti. Ankara. 2012*.
- [28] G.G. Güreşçi, K. Seyrek Sargın, AH Coğrafi Bilgi Sistemleri ile hidroloji uygulamaları. *Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, CBS Şube Müdürlüğü. Ankara. 2012*.
- [29] Y. Bayazit, R. Bakış, and C. Koç, An investigation of small scale hydropower plants using the geographic information system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 289-294, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.062>.
- [30] H. Desalegn, B. Damtew, A. Mulu and A. Tadele, Identification of potential sites for small-scale hydropower plants using a geographical information system: A case study on fetam river basin. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 104(1), 81-94, 2023. <https://doi.org/10.1007/s40030-022-00692-8>.
- [31] R. Bakış, C. Koc, Y. Bayazit, S. N. Cabuk, Application of geographic information system to select dam location for hydropower. *International Journal of Sustainable Energy and Environmental Research*, 9(1), 56-72, 2020. <https://doi.org/10.18488/journal.13.2020.91.56.72>.
- [32] E. D. Taylan ve D. Damçayırı, Isparta bölgesi yağış değerlerinin IDW ve Kriging enterpolasyon yöntemleri ile tahmini. *Teknik Dergi*, 27(3), 7551-7559, 2016.
- [33] A. İlker, Ö. Terzi ve E. Şener, Yağışın alansal dağılımının haritalandırılmasında enterpolasyon yöntemlerinin karşılaştırılması: Akdeniz Bölgesi örneği. *Teknik Dergi*, 30(3), 9213-9219, 2019. <https://doi.org/10.18400/tekderg.334186>.


- [34] C.D. Loyd, Local models for spatial analysis. CRC Press, London and New York, 2007.
- [35] H.H. Aksu and K. Hepdeniz, Mapping with the aid of Geographic Information System and analysis of annual and monthly average maximum air temperature distribution in Burdur. Mehmet Akif Ersoy Uni. J. Gradu. Sch. Nat. Appl. Sci., 7, 202-214, 2016.
- [36] E. Gómez-Llanos, P. Durán-Barroso, J. Arias-Trujillo, J. M. Ceballos-Martínez, J. A. Torrecilla-Pinero and M. Candel-Pérez, Small and micro-hydropower plants location by using geographic information system. Proceedings 2 (20), 1300, 2018. <https://doi.org/10.3390/proceedings2201300>.
- [37] M. M. Dağhan, Hidroelektrik enerji üretim için baraj yeri seçiminde coğrafi bilgi sistemlerinin (CBS) kullanılması ve uygulamaları (Seydisuyu havzası) Master's thesis, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.
- [38] G. Alcalá, L. F. Grisales-Noreña, Q. Hernandez-Escobedo, J. J. Muñoz-Criollo, and J. D. Revuelta-Acosta, Shp assessment for a run-of-river (Ror) scheme using a rectangular mesh sweeping approach (msa) based on gis. Energies, 14(11), 3095, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14113095>.
- [39] D. Setiawan, Potential sites screening for mini hydro power plant development in Kapuas Hulu, West Kalimantan: a GIS approach. Energy Procedia, 65, 76-82, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.01.034>
- [40] S. O. Akande, Y. A. Sanusi, L. M. Sanni and I. N. Abdullahi, Geospatial assessment of small hydropower potentials in Ogun watershed for rural electrification. Journal of Renewable Energy and Sustainable Development, 8(2), 35-44, 2022. <http://dx.doi.org/10.21622/RES.D.2021.07.2.035>
- [41] T. Sekac, S. K. Jana and D. K. Pal, Identifying potential sites for hydropower plant development in Busu catchment: Papua New Guinea. Spatial Information Research, 25, 791-800, 2017. <https://doi.org/10.1007/s41324-017-0145-z>
- [42] J. J. De Melo, A. Galvão and M. J. F. Sousa, Evaluating the energy contribution of small hydropower in the European Mediterranean Basin. EuroNatur, RiverWatch and NOVA University Lisbon. pp. 44 2020.
- [43] F. Ali, C. Srisuwan, K. Techato and A. Bennui, Assessment of small hydropower in Songkhla Lake Basin, Thailand using GIS-MCDM. Sustainable Water Resources Management, 9(1), 25, 2023. <https://doi.org/10.1007/s40899-022-00788-w>.
- [44] Y. Bayazit, R. Bakış, and C. Koç, A study on transformation of multi-purpose dams into pumped storage hydroelectric power plants by using GIS model. International Journal of Green Energy, 18(3), 308-318, 2021. <https://doi.org/10.1080/15435075.2020.1865362>
- [45] D. G. P. Cuya, L. Brandimarte, I. J. Popescu, Alterach and M. A. Peviani, GIS-based assessment of maximum potential hydropower production in La Plata basin under global changes. Renewable Energy, 50, 103-114, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.06.019>.
- [46] Y. Zheng and M. Sahraei-Ardakani, Leveraging existing water and wastewater infrastructure to develop distributed pumped storage hydropower in California. Journal of Energy Storage, 34, 102204, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102204>.
- [47] C. Penche, Guide on How to develop a small hydropower plant. European Small Hydropower Association, 296, 1998,
- [48] Y. Tian, F. Zhang, Z. Yuan, Z. Che, and N. Zafetti, Assessment power generation potential of small hydropower plants using GIS software. Energy Reports, 6, 1393-1404, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.05.023>.
- [49] Y. Zhou, S. Guo, C. Y. Xu, F. J. Chang, H. Chen, P. Liu and B. Ming, Stimulate hydropower output of mega cascade reservoirs using an improved Kidney Algorithm. Journal of Cleaner Production, 244, 118613, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118613>.





Multifunctional polymer nanocomposite coated antibacterial filters for air-purification

Hava temizleme için çok fonksiyonlu polimer nanokompozit kaplamalı antibakteriyel filtreler

Arife Kübra Yontar^{1,*} , Onur Yontar² , Sinem Çevik³ 

¹ Ondokuz Mayıs University, Samsun Vocational School, Department of Mechanical and Metal Technology, 55100, Samsun, Türkiye

² Ondokuz Mayıs University, Department of Mechanical Engineering, 55139, Samsun, Türkiye

³ Ondokuz Mayıs University, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 55139, Samsun, Türkiye

³ Ondokuz Mayıs University, Department of Nanoscience and Nanotechnology, 55139, Samsun, Türkiye

Abstract

Products used and produced in industrial locations must have natural ingredients and minimal energy usage due to air and environmental pollution. It is impossible for standard filters to clean bacteria in homes, workplaces and areas working with biological creatures. Therefore, the production of multifunctional nanocomposite and hybrid filter papers is necessary. In the study, filter papers coated with nanocomposite solutions prepared from green synthesized nanosilver (AgNPs) with plant extracts and Polyvinyl Alcohol (PVA). Scanning Electron Microscope (SEM) analyses showed that silver nanoparticles and PVA homogeneously coated the filter paper fibers, thereby reducing the average pore diameters by only 3% compared to commercial standards of filter paper. A filter with 36% higher burst pressure resistance was produced by nanosilver, plant extracts and PVA modification. The antibacterial effect is provided to the filters with a high effect of up to 10000 times, by coating them with nanosilver and plant extracts. This study made it possible to produce filter paper with natural ingredients and at low cost, reducing energy and raw material consumption, with high antibacterial effect and mechanical strength. In this way, bacteria and pollutants in the air will be cleaned without harming the environment and human health.

Keywords: Antioxidants, Air filters, Plant extracts, Green synthesis, Air purification, Nanosilver

1 Introduction

As stated by the World Health Organization (WHO), almost 90% of the global population lives where air pollution levels exceed the guidelines for air quality. Air pollution and particulate matter (PM) have become one of the most critical problems of our time. Environmental pollution, various diseases and particulates and airborne microorganisms that cause climate crisis occur with industrial applications and automobile emissions [1, 2]. The main constituents of PM include chemical impurities such as elemental carbon, sulfate, organic carbon, chloride, nitrate, iron, and calcium,

Öz

Hava ve çevre kirliliği, endüstriyel alanlarda kullanılan ve üretilen ürünlerin doğal içerikli ve düşük enerji tüketimine sahip olmasını gerektirmektedir. Evlerde, işyerlerinde ve biyolojik canlılarla çalışılan alanlarda standart olarak kullanılan filtrelerin bakterileri temizlemesi mümkün değildir. Bu nedenle çok fonksiyonlu kompozit ve hibrit filtre kağıtlarının üretimi gerekmektedir. Çalışmada yeşil sentezlenmiş nanogümüş (AgNPs), bitki ekstraktları ve Polivinil Alkol (PVA) ile hazırlanan nanokompozit solüsyonlarla kaplanmış filtre kağıtları kullanıldı. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizleri, gümüş nanopartiküllerin ve PVA'nın filtre kağıdı elyaflarını homojen bir şekilde kapladığını, böylece ortalama gözenek çaplarını, filtre kağıdının ticari standartlarına kıyasla yalnızca %3 oranında azalttığını gösterdi. Nanogümüş, bitki özleri ve PVA kullanılarak %36 daha yüksek patlama basıncı direncine sahip bir filtre üretildi. Filtreler nanogümüş ve bitki özleri ile kaplanarak 100.000 kata kadar yüksek etki ile antibakteriyel etki sağlanmaktadır. Bu çalışma, doğal içerikli, düşük enerji ve hammadde tüketimine sahip, düşük maliyetli, antibakteriyel ve mekanik mukavemeti yüksek filtre kağıdı üretimine olanak sağladı. Bu sayede hava ortamındaki bakteri ve kirleticiler çevreye ve aynı zamanda insan sağlığına zarar vermeden temizlenmiş olacaktır.

Anahtar kelimeler: Antioksidanlar, Hava filtreleri, Bitki özleri, Yeşil sentez, Hava temizleme, Nanogümüş

as well as smoke from automobile exhaust pipes, burning coal, burning farming, and emissions from industries [3]. In addition, complex and rich pollutants in the air can come from natural sources (aerosolized soil, forest fires, pollen, dust storms) or anthropogenic (industry, transportation, construction, smoking, home heating, etc.) sources. When these pollutants are inhaled, they enter the bronchi and obstruct the airway passages and cause serious health problems including illnesses related to respiration such as severe asthma, cardiovascular morbidity, mortality, bronchitis, etc [4]. Technically, if PM is 2.5 µm or less in diameter they are clearly hazardous and, with prolonged

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: kubra.demirbas@omu.edu.tr (A. K. Yontar)
Geliş / Received: 30.11.2023 Kabul / Accepted: 16.01.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1398545

exposure, can travel to the human lungs or, in certain situations, other organs in the body, this leads to increasing cardiac morbidity and respiratory. Aerosols in the air, such as volatile organic compounds (VOCs), solid particles, and bioaerosols (instance viruses, bacteria, fungus, and mold), can also cause respiratory and cardiovascular illness, as well as allergies [5, 6]. Due to these pollutants, improving air quality and providing filtration is important to protect the indoor and outdoor environment, air cleanliness and human health. The individuals spend 87% of their daily hours in their homes and 6% in cars, as indicated by the National Human Activity Pattern Survey (NHAPS). As a consequence, it is one of the most effective techniques to safeguard human health from the harmful effects of air pollution is to high-performance air purification filters are used to catch PM particles in building air conditioning systems and ventilation, as well as the use of personal face masks during outdoor activities. Air filtration technology (such as stretched electrostatic capture filtration, fiber and membrane filtration) is critical to enhancing IAQ and safeguarding human health [7]. Air Conditioning (HVAC), ventilation and heating systems in use today and all the various industrial air filters can reduce all particulate, airborne disease transmission. Because the HVAC system captures and traps both particles and microorganisms in the air filters, they can minimize microorganism rotation in the air. Bioaerosol particles grow and survive on the filter media due to dirt buildup in HVAC systems, inadequate particulate filtration levels, poor filter maintenance, or problems with moisture sources. In the long run, people indoors breathe microbial pollutants that multiply and are then released into the air, flowing through the HVAC system. As a consequence of this, major air quality issues cause health issues. Furthermore, germs are known to induce corrosion in the metallic and polymeric components of the filtering system [8]. Air filters are classified into two types: porous filters and fibrous membranes. Fiber filters have the benefit of being remarkably simple to produce on a big scale while also being energy and cost-efficient.

Traditional fiber-structured cellulose filters are currently frequently utilized in commercial air filtration applications. Other types of material used as a modification in the production of paper air filters are polyacrylonitrile (PAN), polysulfone amide (PSA), polyurethane, polyimide, polyamide 66, polylactide, polytetrafluoroethylene (PTFE), polypropylene (PP), polystyrene (PS), polyvinyl pyrrolidone (PVP), nylon-6 and biopolymer polyvinyl alcohol (PVA) polymers. PVA is a kind of synthetic polymer that is polar and biodegradable, water-soluble, inexpensive, non-toxic, has good thermal, mechanical and chemical stability, and has better environmental stability. PVA is widely used in many different kinds of applications, including artificial biomedical devices, membrane applications, electrochromic devices, paper coating, drug delivery systems, electronic devices, packaging and textile applications. In addition, PVA includes a carbon chain structure with hydroxylic groups, which can be a source for hydrogen bond interaction between nanofillers, facilitating the production of PVA-based nanocomposites [9–11]. Because of these numerous

advantages, PVA was chosen as the coating matrix material in this study.

Various yet ineffective cleaning and disinfection technologies, such as UV germicidal irradiation, air ozonolysis, and photocatalytic oxidation, have been developed to improve air quality and destroy bioaerosol particles. In recent years, various novel methods and techniques for avoiding and repelling microbial proliferation in air filters have been developed, including the use of silver nanoparticles (AgNPs), carbon nanotubes (CNT), titanium-based nanoparticles, iodine powders, and copper nanoparticles [4]. In general, because of its broad spectrum anti-pathogen effect, silver is the most extensively utilized antibacterial metal. AgNPs can kill more than 650 types of pathogens such as viruses, fungi and bacteria. Silver nanoparticles perform by several mechanisms that include metal ion release, non-oxidative and oxidative stress induction reactions are examples of such processes. The progressive transmission of silver ions released from the AgNP solution prevents bacterial cell development. The electrostatic coaction between silver ions (+) and bacterial (-) and explains how nano silver kills bacteria by rupturing the cell wall, releasing the substance of the inner cell, and eventually killing the bacterias that live there [12, 13]. Toxic chemicals used in the production of metallic nanoparticles cause high levels of damage to the environment. According to the green agreement and climate action plan, all polymer-based materials produced must be environmentally soluble and free of toxic content [14, 15]. In this study, silver nanoparticles used to provide an antibacterial effect in filter papers were obtained by green synthesis with plant extracts and raw materials that do not contain toxic chemicals. The ecologically friendly green method for the metallic nanoparticle production is a one-step bio-reduction process. Plant extracts enable bio(green) nanoparticle formation due to their biomolecules including a variety of hydroxyl groups (-OH) (ortho-dihydroxy, hydroxy, carboxy, catechol, amino-) [16, 17]. Terpenoids, flavonoids, phenolic acids, polyphenols, enzymes, amino acids, alkaloids, phenols, carbohydrates, tannins, proteins, or saponins are plant biomolecules that maintain and reduce metal ions (M^+) (M^0) [18]. In the study, the preferred plant extracts for the green synthesis process are Hemp Seeds and St. John's Wort because they are plants with high secondary metabolites. These plant species were selected as a result of previous researches [18, 19]. Each plant species found in nature contains different phenolic groups and organic acids, depending on its variety and type. In the study, Hemp Seeds [20] containing high levels of antioxidants, carboxylic acids, canniprene, and flavonoids and St. John's Wort [21] extracts containing hypericins, flavonoids, hyperforins, antioxidants, mono- and poly-saccharides, phenolic acids were used. It is a proven finding that the pharmacokinetic and therapeutic effects of herbs with different components and secondary metabolites increase more when combined. Despite the fact that this process has not been fully described in the literature, the increased creation of C-O, C-N and C-H bonds with (-OH) groups in various carboxylic and phenolic groups has been identified as a particular instance explanations for the

enhanced impacts of employing plant extracts in combinations [22–24].

The aim of this study is to produce filters used in industrial areas with antibacterial properties by coating of metallic nanoparticles produced using natural ingredients and green production methods. In addition, it has been ensured that this production is safe for human health and natural environmental health, uses low energy and raw materials, and has antibacterial properties. In addition, it is aimed to enhance the mechanical strength of the filter papers by using PVA and nanosilver. Characterization tests, performance tests and antibacterial tests of the produced filters were carried out. Thanks to the determined materials and methods, filter papers with antibacterial effect and high durability that do not harm the environment and human health have been produced.

2 Material and method

PVA has a molecular weight of about 95.000 g/mol and 99% hydrolysis was acquired from Sigma-Aldrich Germany. Silver nitrate (AgNO_3) and all plant extracts are used to synthesize silver nanoparticles. Sigma Aldrich provided the silver nitrate salt (90% concentration). St. John's wort and hemp seeds were purchased from the surrounding market, and all plants were made through DI water wash. Following washing, plants were chopped into tiny bits and dried out for 15 minutes at 80°C in the preheated oven. In order for the acids, metabolites, phenolic groups, minerals and metabolites in plants to be released into water intensively and quickly, the first step to be taken into consideration is to first cut or grind the plants into small pieces. Plants types used in the nano silver and filter fabrication are shown in Figure 1.

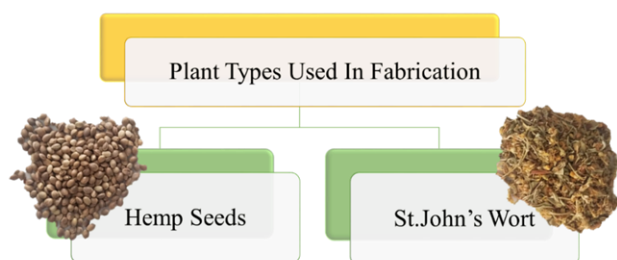


Figure 1. Plants types used in antibacterial filter fabrication

2.1 Green synthesis production of AgNP

In addition to plant extracts, nano silver, one of the most effective metals used to give antibacterial properties to filter papers, was preferred. Nanosilver is produced naturally by the green synthesis method, using only plant extracts, without using any chemicals. While performing nano silver synthesis, the parameters utilized in synthesis used in the previous study were taken into account [18, 19, 25–27]. For the purpose of the creation of plant extracts, 25 g of ground dried herb was inserted to 100 mL of distilled water and kept at 90°C for approximately 45 minutes and after finally filtered. The first procedure in nano silver synthesis is the preparation of 0.1 mM AgNO_3 solution. For this, 0.6 g of AgNO_3 salt should be added to 36 mL of distilled water and

stirred magnetically at room temperature until a homogeneous solution is obtained. 4 mL of plant extract was added to the AgNO_3 solution and continued mixing with a magnetic stirrer. Stirring was continued until the color of the prepared chemical reaction solution changed from pale yellow to dark gray. After 6 minutes, the resulting solution was completely black; this was indicative of the formation of AgNPs. At this point mixing was terminated. The solution underwent filtering and to wash the nanosilver particles ultrasonically, distilled water was used. The final filtered solutions generated nanosilver particles that were dried for two hours at a temperature of 37°C . Figure 2 demonstrates the synthesis procedure of nanosilver particles from plant extracts. The images vividly show the color differences of the solutions. The black particles precipitated at the bottom of the centrifuge tube are green synthesized nanosilvers. Previous studies have proven that nano silvers can be successfully produced by the green synthesis method using plant extracts and their properties [28–30].

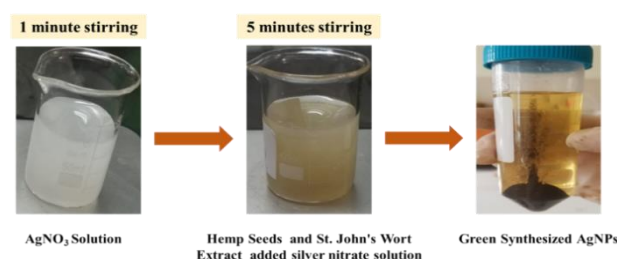


Figure 2. The green synthesis of the nanosilver particles using plant extracts

2.2 Manufacturing PVA/plant extract/AgNPs coating solutions

In the production of antibacterial filters, coating process was carried out by impregnating the coating solutions to the papers by using the solvent casting method. The PVA ratios used in preparing polymer nanocomposite films were prepared with reference from Yontar et.al's [18, 19] studies. Based on comparable researches, the silver nanoparticle adjustment rate employed in the films was identified to be between 2 and 4% [31–36]. These mixing ratios were based on those found in the best quality films. Filter papers are produced by coating with PVA ratios of 2% and 4% in 6 different groups as PVA, PVA and plant extract added and plant extract, PVA and nano silver added. The reason for using 2 different PVA ratios in the study is to investigate the increase the mechanical strength of the papers. It aimed to examine and see how the distribution and amount of PVA in the paper affect the performance values. Sample groups and their contents are given in Table 1 separately by weight. The control sample is commercial filter paper and used for comparisons with other coated sample groups.

Preparing the PVA solution was the initial step in the production process of the coating. To create a homogenous solution, 1 and 2 g of PVA powder were dissolved in 50 mL distilled water in separate beakers at 95°C for an hour. After PVA was dissolved in water, 40 mL of PVA solutions, 10 mL of extracts (hemp seeds and St. John's wort), and 0.25 g of AgNPs were added separately in the beakers.

Table 1. The coated filter paper groups and their contents

Control	PVA-2	PVA-4	PE/PVA-2	PE/PVA-4	PE/PVA/Ag-2	PE/PVA/Ag-4
	1 g PVA	2 g PVA	1 g PVA	2 g PVA	1 g PVA	2 g PVA
Commercial Sample	50 mL DI water	50 mL DI water	40 mL DI water	40 mL DI water	40 mL DI water	40 mL DI water
	-	-	10 mL Plant Extracts	10 mL Plant Extracts	10 mL Plant Extracts	10 mL Plant Extracts
	-	-	-	-	0.25 g AgNPs	0.25 g AgNPs

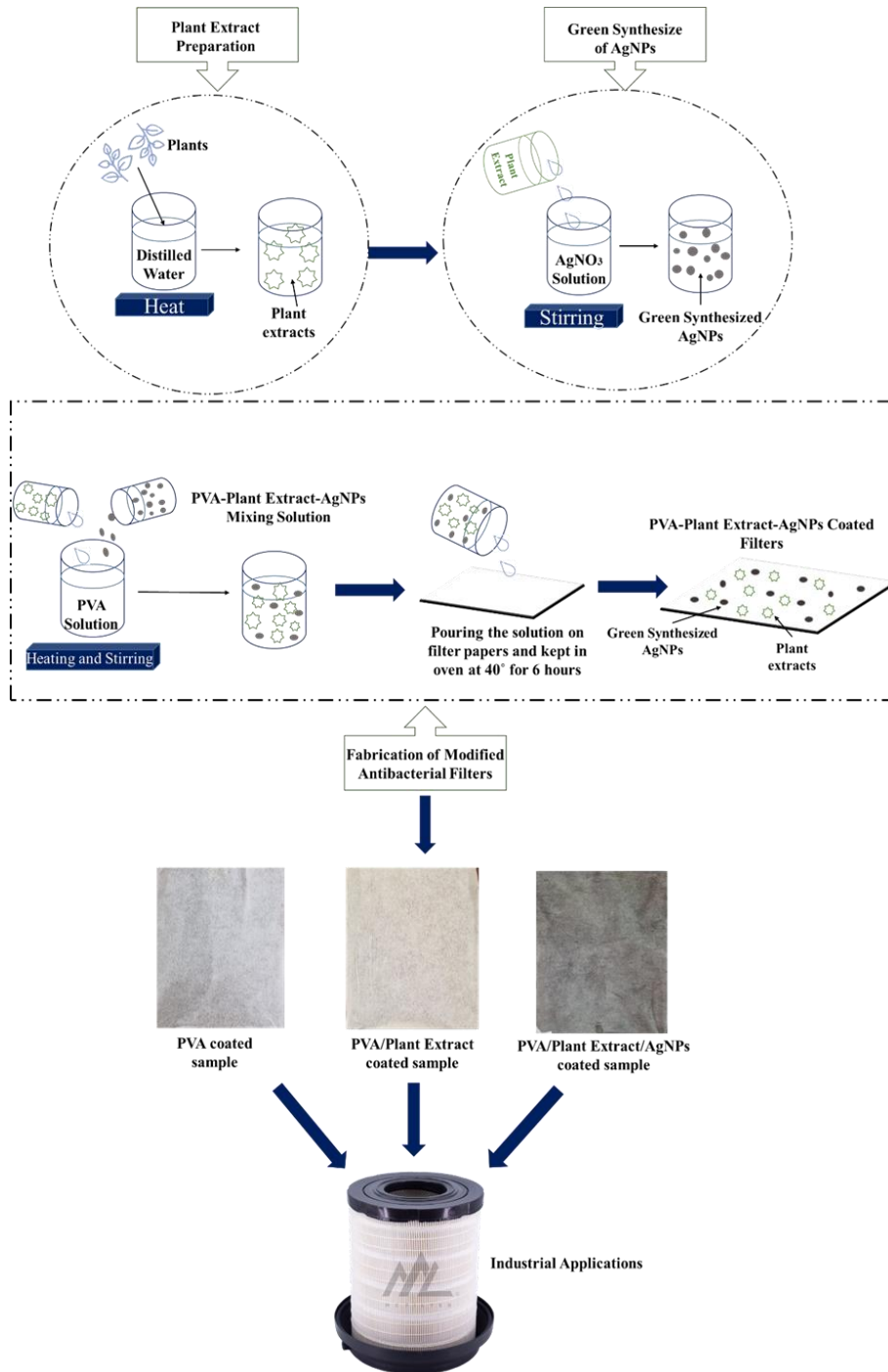


Figure 3. Antibacterial filters fabrication process and produced samples

The resulting mixtures were stirred constantly for 1 hour at 90 °C. Stirring was maintained for 1 hour at 90 °C until all the combined components were homogenous. The polymer coating mixtures were embedded over filter papers, allowed to impregnate for five minutes, and then placed in an oven at 40°C for six hours by hanging the papers vertically in the oven. Figure 3 demonstrates the manufacturing of antibacterial filters and their images.

2.3 Characterizations

A (JEOL 7001F) model scanning electron microscope (SEM) equipped with an EDS analysis adaptor with an 80 mm² X-MAX detector was utilized to evaluate the samples' chemical composition and microstructure incorporating EDS. All of the filter samples underwent SEM examination to determine the size and distribution silver nanoparticles and PVA at all surfaces. Resolution measured under the acceleration voltage of 5 and 10 kV. For imaging in SEM, modified filter papers were divided into 1 x 1 cm squares and coated with gold and palladium. Substances were exposed to chemical analysis using energy dispersive spectroscopy (EDS). EDS spectra and map analysis were used to identify the chemical contents of filter samples and nano silver particles. The presence of Ag elements, plant extracts and PVA on the coating surface of the produced samples was determined by EDS. PVA, nanosilver and plant extracts coatings on the samples were analyzed employing XRD with a Rigaku Smart Lab CuK radiation monochromatic filter to detect their crystal structures at room temperature in the 20°–80° range at a rate of 1°/min and wavelength of 1.2 Å XRD data are collected employing 2D HyPix-3000 area detectors. In order to examine the antibacterial coatings properties developed in the study in XRD, the prepared polymer solutions were turned into thin films by solvent casting method and these films were divided in 1 x 1 cm dimensions. Similarly, these films were cut into 1 x 1 cm dimensions and used for FTIR analysis. The impacts on the structure of silver nanoparticles and extracts of the PVA matrices were evaluated using (Bruker Tensor 27) model Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) analysis in the 650-4000 cm⁻¹ wavenumber range.

2.4 Performance tests

The performance of the filter papers produced after coating was carried out using devices from M.C.Filter Ltd. company in Samsun/Turkey. All tests were performed 7 times and average values were calculated. In order to determine the permeability properties, the test was carried out on filter paper samples with a diameter of 16 mm and an area of 20 cm² depending on the permeability unit of l/m²/s' under 200 Pa pressure in consensus with the TS ISO 5636-5 standard. The total number of pores and their locations vary according to the modification and coating processes applied to the filters. For this reason, the pore diameter test was applied to the coated filter paper samples. In this test, using Denanol according to TS 4230 EN 24003 standard, the paper was cut in accordance with the chamber diameter of the device and clamped. By adjusting the temperature at a certain rate, the device was stopped at the fixed point. This process

was conducted seven times, with the average measurements of the result gave the pore diameter values of the filters. The mechanical strength of the filter papers coated separately with 2 and 4% PVA ratios can vary with the polymer compared to the control sample. In the high-pressure air cleaning environment, filter papers are damaged due to pressure. As a consequence, it is critical to identify how using PVA in different ratios affects the deformation of the papers under what load. A Burst pressure test was applied to the papers in accordance with TS 3124 EN ISO 2758 standard. The paper is fixed to the device and pressure is applied and the test is terminated at the first tear. The resulting value is in kgf/cm² unit and the maximum load value at which the paper can be used has been calculated.

2.5 Antibacterial efficiency

A modification of the Japanese Industrial Standard JIS Z 2801 was used to test the antibacterial activity of the modified filter papers [37]. The samples were sterilized under a UV lamp for 15 minutes. *E. coli* (ATCC 25922) and *S. aureus* (NCTC-13552) bacteria were prepared at 10⁷ CFU/ml, and 1 x 1 cm test samples were placed in it. A 5 x 10⁶ CFU/ml culture prepared without adding a sample was used as a control. Eppendorf tubes containing samples were shaken at 150 rpm for 4 hours. To separate microorganisms adhering to the sample surface, it was kept in an ultrasonic water bath for 30 seconds and then vortexed. Dilution was made by transferring 100 µL of suspension into 900 µL of physiological saline (FTS). The petri dish containing Plate Count Agar (PCA) was divided into 3 and 25 µL of each dilution was planted, 3 petri dishes were studied. As a result of 24 hours of incubation at 37 °C, the antimicrobial activity value was counted as colonies forming units (CFU). The material without any treatment was taken as a control, and the difference in growth between the polymer-treated culture was evaluated logarithmically. *E. coli* bacteria were planted on TBX agar as a control, and blue colony formation confirmed that it was *E. coli*.

3 Results and discussion

3.1 Characterizations

Modified nanocomposite coating films and control PVA film were divided into 1x1mm squares and investigated by SEM. SEM images of uncoated filter paper were also examined for the purpose of making a comparison with coated filter papers. Figure 4(a) shows SEM images of commercial filter paper. It is also evident from the EDS results of Figure 5(a) that there is no modification on the fibers. It was observed in Figure 4(d-e), the plant extract-derived particles had been distributed uniformly throughout the polymer matrix. The primary C and O components detected in all samples in the EDS spectrum analysis are thought to originate from the chemical composition of PVA and the carbon bands used to fix the samples to the SEM holder. It is also known that they come from the chemical structure of the cellulose used in the production of filter paper. Additionally, it is included in the outcomes of the EDS analysis discovered in related searches [38, 39]. It has been

established from the images of Figure 4(b-c) that the fibers of the PVA-2 and PVA-4 samples are coated with PVA smoothly, only in some regions where PVA is densely deposited at the junction points of the fibers. The fact that the fibers of the PVA-4 sample more condense and frequently than the fibers of the PVA-2 sample is due to the higher amount of PVA used in coating. In PE/PVA-2 and PE/PVA-4 samples, the white particles with different shapes, which are found in large amounts on the fibers, come from plant extracts. In the images of Figure 4(d-e), it is noticed that the plant extract particles have a uniform distribution on both plant extract-modified filter paper surfaces. In addition, Figure 5(d-e) EDS spectrum and mapping results confirm that these particles come from extracts. It is a well-known truth that Hemp Seeds and St. John's Wort plants contain plenty of P, Ca, Mg, K and Fe [20, 21]. The presence of these minerals on the surfaces of these two samples coated with extracts and PVA was clearly demonstrated in the EDS results. While the Pd element seen in the EDS spectrum findings come from the coating made to provide conductivity so that the samples can be viewed in the SEM device. Ti is the contamination product from the external environment to the surface. SEM pictures showed a distinct detection of

AgNPs on the PE/PVA/Ag-2 and PE/PVA/Ag-4 sample surfaces and are shown in Figure 4(f-g). White spherical dots on the filter fibers' surfaces are silver nanoparticles. It is clear from the EDS mapping and spectral results in Figure 5(f-g) that these particles are not just particles from plant extracts. It has been also revealed that silver nanoparticles are present and homogeneously dispersed in the PVA matrix on all two sample surfaces. Silver nanoparticles agglomerated in several areas, however, the amount was minimal degree. Apart from nano silver, the element K, which is captured by EDS spectra comes from plant extracts, and is also present in both samples. SEM and EDS examinations have proven that nanosilver and plant extracts modified with PVA coatings homogeneously dispersed on the surfaces of the fibers. The coating process did not dramatically affect pore closure or distribution. The size and distribution of the pores are critical to successful filtration. The homogeneous dispersion of nano silvers produced by green synthesis on the filter paper as desired is an important step for the emergence of an antibacterial effect. In addition, the presence of the elements from the minerals contained in the extracts on the fibers is important evidence for the green synthesis mechanism and the antibacterial effect.

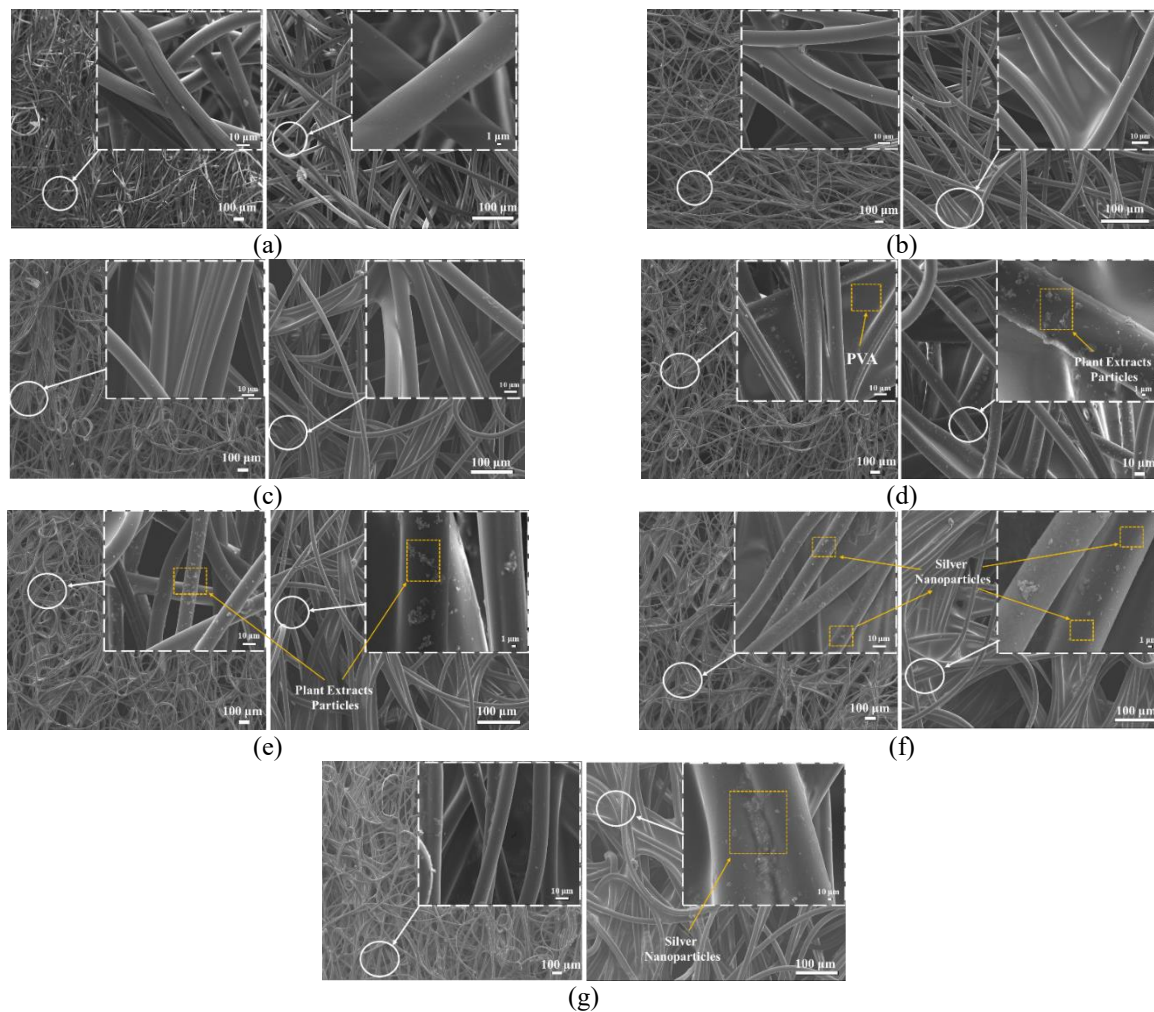


Figure 4. SEM images of (a) Control, (b) PVA-2, (c) PVA-4, (d) PE/PVA-2, (e) PE/PVA-4, (f)PE/PVA/Ag-2 and (g) PE/PVA/Ag-4 filter samples

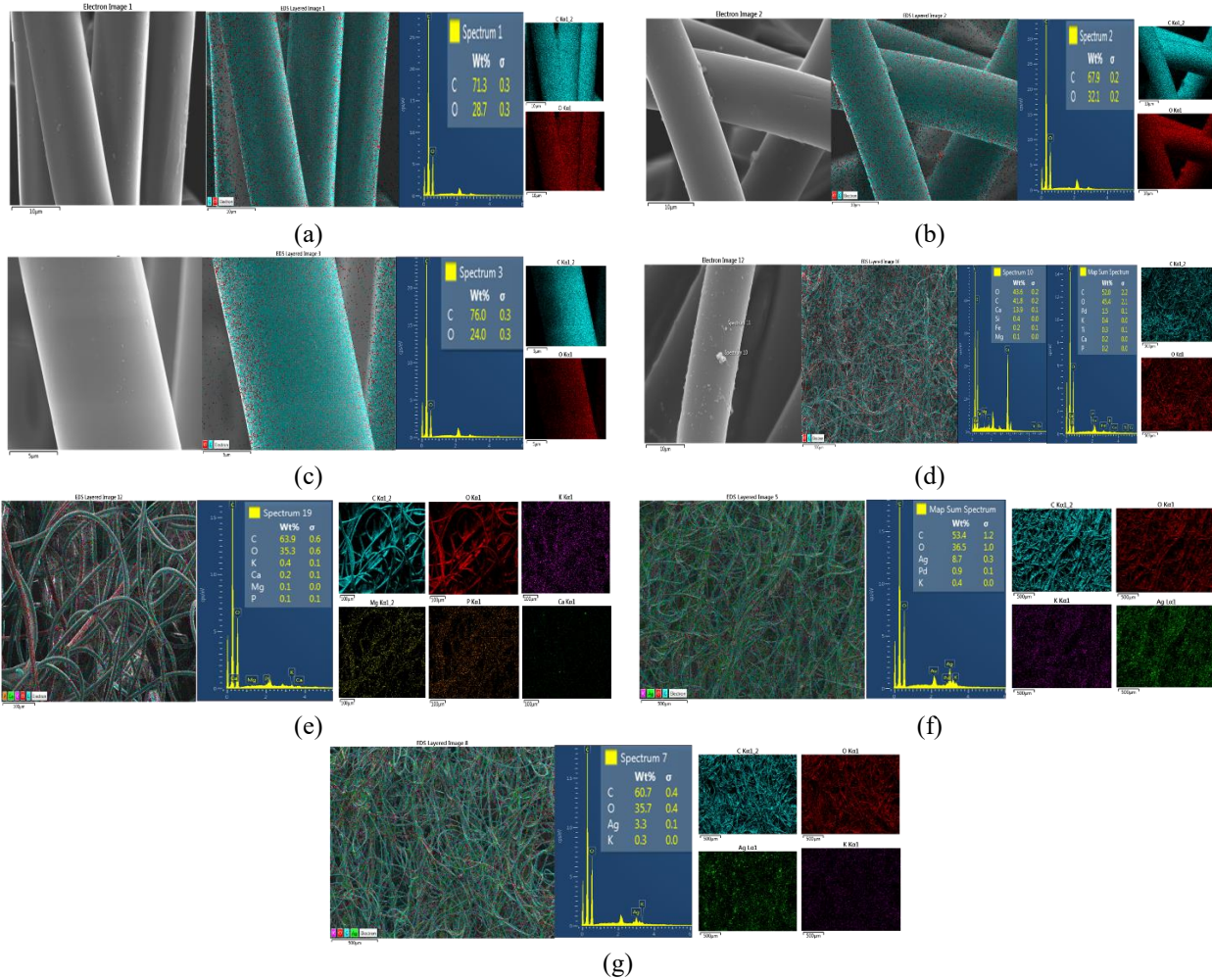


Figure 5. The findings of EDS mapping and spectrum analysis of (a) Control, (b) PVA-2, (c) PVA-4, (d) PE/PVA-2, (e), PE/PVA-4, (f) PE/PVA/Ag-2, (g) PE/PVA/Ag-4 filter samples

XRD analyses were performed on 1x1mm-sized coated filter samples. Characterization tests were selected from the groups with the highest performance characteristics from the coated filter samples. Figure 6 depicts PVA, plant extract-modified PVA, and plant extract and nano silver-modified PVA samples XRD patterns. Regarding the underlying structure of PVA, the high peak reflections at $2\theta = 19.7^\circ$ are derived. These peaks are caused by the crystal planes (101) in PVA's semi-crystal structure. All of the visible peaks at 2θ values of around 38.7° , 45.3° , 63.4° , 76.7° , and 80.9° demonstrate face-centered cubic structure (fcc) of silver nanoparticles. These peaks resemble Bragg's reflections (311), (220), (200), and (111), respectively. Peak broadening in the X-ray diffraction spectrum is frequently related to smaller particle sizes. Silver nanoparticles in nanocomposite coated samples are readily apparent in the XRD patterns. Because crystal structure formation did not occur, sharp peaks were not created in the XRD results for the PE/PVA-4 sample.

All 1x1mm square samples were evaluated and interpreted using FTIR analysis. The transmittance band at 3253 cm^{-1} in the FTIR spectrum (Figure 7) is equivalent to the OH stretching vibration generated by pure PVA. The

peaks at 2929 cm^{-1} and 2905 cm^{-1} are equivalent to symmetric and asymmetric stretching of the C-H alkyl group, respectively. Likewise in the neat polymer structure, the transmittance peak at 1637 cm^{-1} is induced by the stretching vibration of the acetate C=O group. The 1443 cm^{-1} peak is due to CH_2 bending, the $955\text{-}1160\text{ cm}^{-1}$ band is a result PVA acetyl C-O stretching, and the 833 cm^{-1} transmittance peak is due to the original polymer's rocking C-H band [40]. The heterocyclic compounds' C=C bonds' stretching vibrations in St. John's Wort-Hemp Seeds extracts caused the formation of a new adequate band at 1644 cm^{-1} in the case of PE/PVA-4 and PE/PVA/Ag-4 films. The detected rise in the peak of absorption of C=C bonds may be attributed to the functional groups found in plant extracts. The plant extracts decreased the stretching vibration bands of the C-O and O-H bonds in the coating material structure, displaying that the extracts influenced the PVA structure. The new bonds formed by the HO- bonds of secondary metabolites derived from the PVA molecular chain and plant extracts ended up in C=C bonds rather than C=O vibrations [19]. The appearance of hyperforin, carbohydrates, phenols, alcohols, or water molecules from plant extracts results in the existence of a wideband associated with OH group stretching

vibrations that exist between 3450-3250 cm^{-1} [41, 42]. Following the AgNPs' immediate integration into the PVA matrix, certain polymer chain bonds ruptured, and new chains were produced in the vibrations of the C-H, C=O, and O-H groups in the PVA structure. When comparing the spectra of AgNPs modified PE/PVA/Ag-4 samples, the strength of the vibrational bands at 2941, 1722, 1424, 1322, 1038, and 833 cm^{-1} , which are equivalent to the stretching vibration of CH_2 , is clearly visible. As shown by the C=O stretch, C-H breakage vibration, C-H bending vibration of CH_2 , C-C stretching vibration and the C-O stretching of acetyl groups of PVA, the molecules of the polymer were successfully adsorbed onto the outermost layer of the silver nanoparticles [18, 43]. The rise in the FTIR spectrum between 1350 and 1650 cm^{-1} is equivalent to the CH_2 and C-H bond and shows fractured chains. In the PE/PVA/Ag-4 sample, AgNPs created new bonds in this range. Since oxygen atoms offer duplet filling in an empty space on the outer layer of silver atoms as well as benzene rings are present in plant compounds, the band of C=O weakens and moves from 1712 cm^{-1} to 1649 cm^{-1} . Plant extract molecules and nanosilver disrupted the PVA chains and established new bonds, according to all FT-IR spectra.

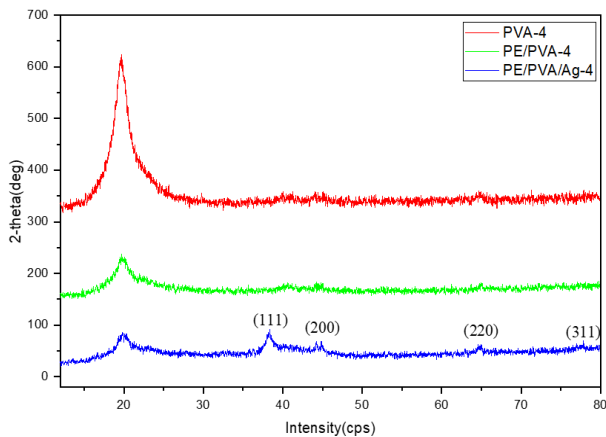


Figure 6. XRD results of neat PVA film and antibacterial filter coating films

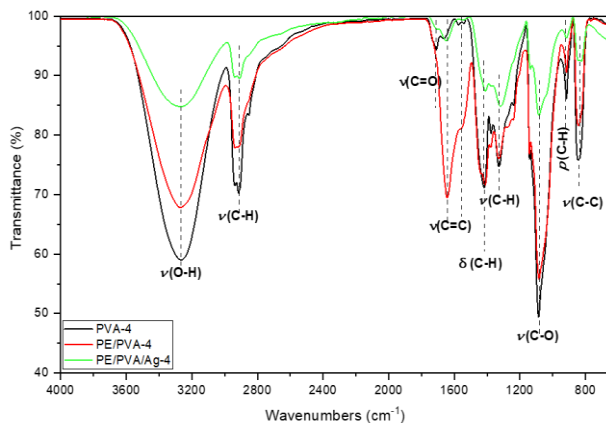


Figure 7. FTIR results of neat PVA film and antibacterial filter coating films

3.2 Performance tests

The high air permeability of the filter papers used in the industrial industry and automotive provides an increase in the amount of cleaner air and a faster filtration process. The effects of PVA and nano silvers, which were used in the study to provide an antibacterial effect and high mechanical strength, on the permeability properties of the filters are shown in the graph in Figure 8(a). The filters with the highest permeability compared to the control sample were PVA-4 and PE/PVA/Ag-2. The average pore diameters of the PVA-4 and PE/PVA/Ag-2 samples were calculated to be only 3% lower than the commercial standards of the filter paper. This can be explained by the coating of PVA and nano silvers on the fibers, providing sufficient porosity without filling the filter paper pores. Although it was thought that PVA would reduce the permeability by filling the voids of the fibers, on the contrary, the porosity values were increased with the addition of high adhesiveness and nano silver, resulting in a low decrease in the amount of permeability. Although this decrease is an expected result, it is higher than the results obtained in similar studies [44, 45] and with the applied coating only 11% and 13% reductions occurred in the permeability amounts of these samples, respectively. The fact that the pore sizes of filter samples coated only with PVA are lower than those of nano silver modified samples is due to PVA filling the gaps between the fibers by forming a film. Nano silver particles disperse in the PVA structure and form chemical bonding. With binding, the amount of water molecules in the PVA chains decreases. Therefore, a more compact structure is created. This enables PVA modified with nano silver to be coated on the fiber surfaces rather than filling the gaps between the fibers. Thus, the higher amount of pores causes the permeability rate of samples containing nano silver to be higher.

It is clear from the graph in Figure 8(b) that there is no direct proportionality between permeability and pore diameters. The homogeneity of the coatings is another parameter that affects these values. However, it was determined that there was a very low decrease in pore diameters with coating applications. Compared to the control sample, the sample with the smallest pore diameter is PVA-4, while the sample with the highest pore diameter is the PE/PVA/Ag-4 sample. It has been understood that the smaller or higher pore diameter does not adversely affect the permeability. As can be seen in the SEM photographs shown in Figure 4, it was determined that PVA filled the fiber gaps in some regions and this caused a decrease in the pore diameter. The pore diameters of the PE/PVA/Ag-2 and PE/PVA/Ag-4 samples were very close to the control sample values, thanks to the porosity of the plant extracts and silver particles with high surface areas and nano-sizes, and the homogeneous coating on the surfaces by wetting the fibers better. As a result of burst pressure tests of the coated filter papers, it was determined that all coated samples had higher strength than the control sample. As seen in Figure 8(c), PE/PVA/Ag-2 sample had the highest burst strength among the coated samples.

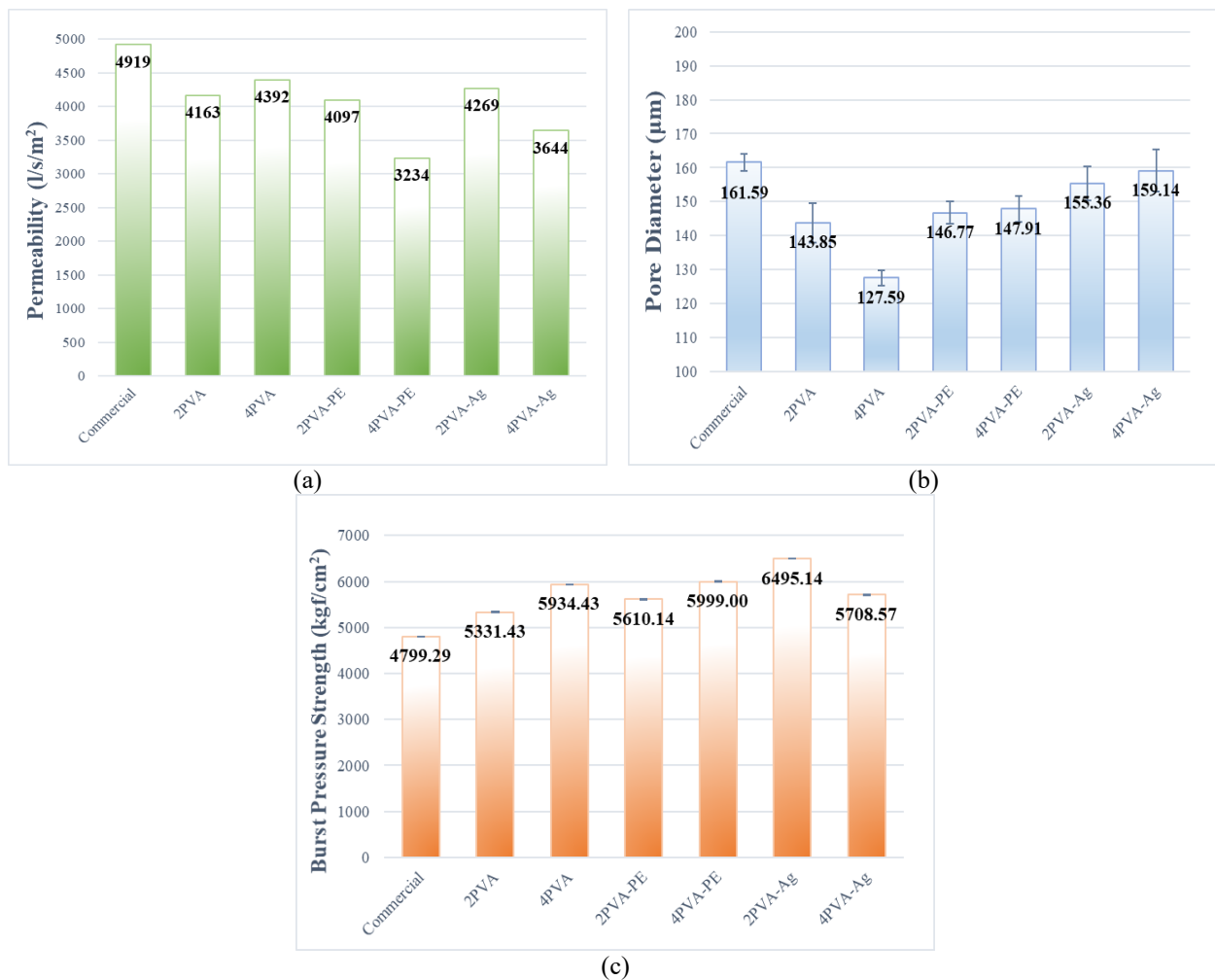


Figure 8. Performance test results, (a) permeability, (b) pore diameter and (c) burst pressure strength

Silver nanoparticles and plant extracts bonded with PVA to form a strong polymer structure and increased the resistance of the filter paper against pressure with the homogeneous distribution of this structure on the fibers. As it is known, nanocomposites prepared with nanoparticles and plant extracts have higher mechanical strengths than unmodified ones. The reason for this can also be shown to be the cross-linking of nano-sized particles with polymer chains [13, 18, 19, 46, 47]. In this way, the strength of the coated filter papers has also increased. Performance test results of all samples revealed that PE/PVA/Ag-2 had 36% higher burst strength than the control sample and was the sample with the closest permeability and pore diameter to the control sample on average.

3.3 Antibacterial efficiency

Figure 9 depicts photos of bacteria growth on agar conducting antibacterial evaluation. Six unique bacterial counts were implanted in the medium of each sample. These bacteria are represented by the numbers $\times 10^6$, 10^5 , 10^4 , 10^3 , 10^2 , and 10^1 . After the antibacterial test, the specimens concentrations and logarithmically decreased numbers of bacteria in the medium are shown in Table 2. Furthermore these decrease rates are visually depicted in

Figure 10. It was determined that the PE/PVA/Ag-4 filter paper sample containing silver nanoparticles had the highest Log_{10} reduction. It inhibited bacterial growth at a value of Log_{10} as 4.04 (10,000 times) against *E. coli* and 3.17 (1000 times) against *S. aureus*. The significant antibacterial activity is likely ascribed to the AgNPs on the filter surface, which can effectively suppress the proliferation of bacteria by damaging the membrane of bacterial cells [48]. Previous research has indicated that antibacterial products will have different antibacterial activity in the presence of *S. aureus* and *E. coli*. Because *S. aureus* contains a stronger cell wall and reduced protein content, it is more difficult to attack by silver ions [49] Hence, the silver-containing filter paper has lower Log_{10} values for *S. aureus* than for *E. coli*. The PE/PVA-4 sample, which does not contain nano silver, was coated only with plant extracts and PVA. The growth reduction ratios of PE/PVA-4 sample against *E. coli* and *S. aureus* were 1.26 and 2.14. This finding demonstrates that the St. John's Wort and Hemp seeds extracts had been quite effective to give antibacterial properties to the filters. The reason why the uncoated commercial filter paper seen in Figure 9(b) also has a low antibacterial effect may be due to its contact with other test samples.

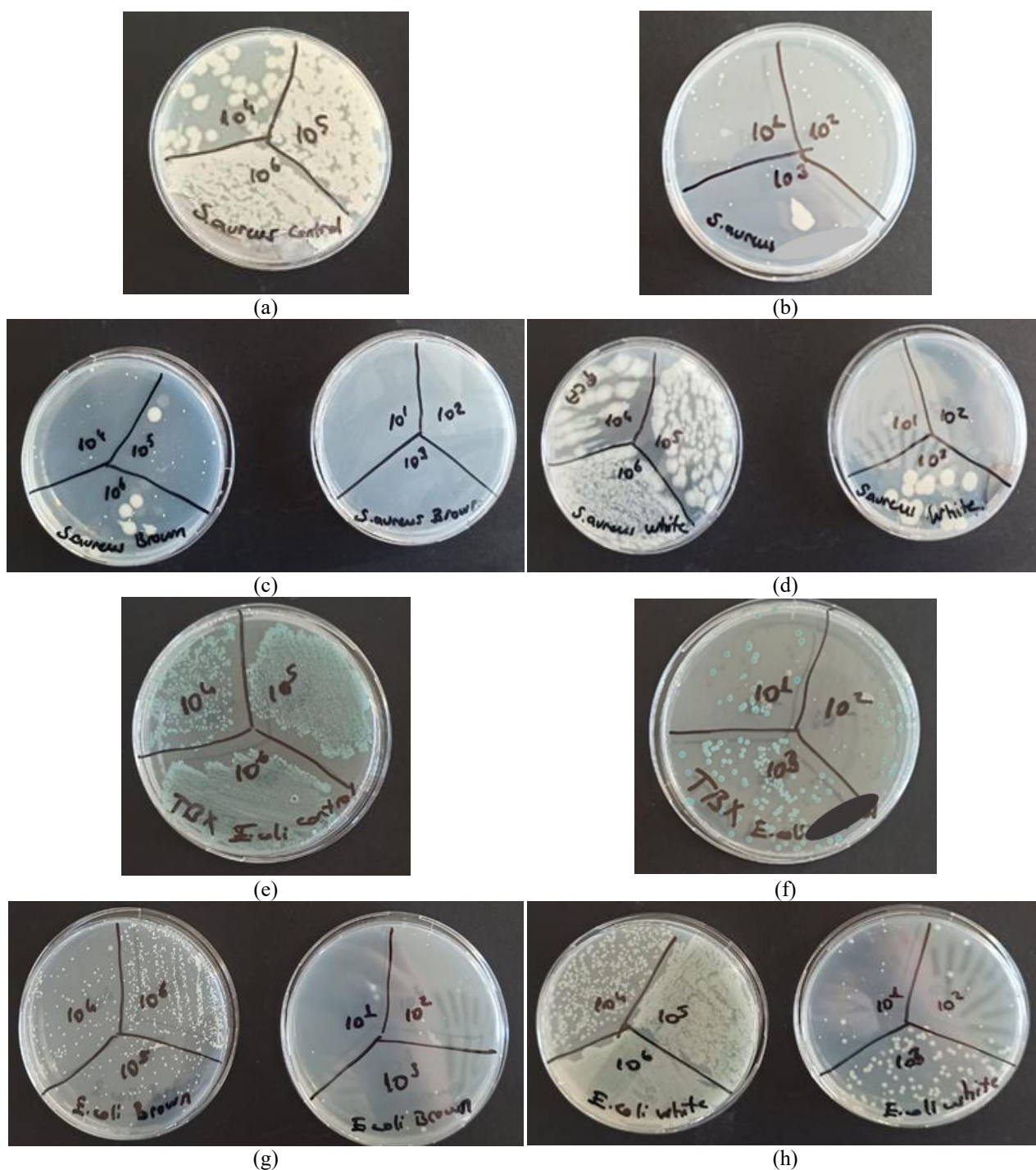


Figure 9. Antibacterial activity tests of (a) control *S.aureus*, (b) uncoated commercial filter paper against *S.aureus* (c) PE/PVA/Ag-4 against *S.Aureus*, (d) PE/PVA-4 against *S.aureus*, (e) control *E.coli*, (f) uncoated commercial filter paper against *E.coli*, (g) PE/PVA/Ag-4 against *E.coli*, and (h) PE/PVA-4 against *E.Coli*

Table 2. Inhibition of *S. aureus*(S) and *E. coli*(E) by log CFU/mL of plant extracts and AgNPs modified filter samples for first antibacterial test method

Bacteria	Control	PE/PVA/Ag-4 Sample Concentration (CFU. ml ⁻¹)	Log ₁₀ reduction	PE/PVA-4 Sample Concentration (CFU. ml ⁻¹)	Log ₁₀ reduction
<i>E. coli</i>	4.4±0.2x10 ⁷	4.0±0.2x10 ³	4.04	2.4±0.4x10 ⁶	1.26
<i>S. aureus</i>	4.2±0.4x10 ⁷	2.8±0.2x10 ⁴	3.17	3.0±0.2x10 ⁵	2.14

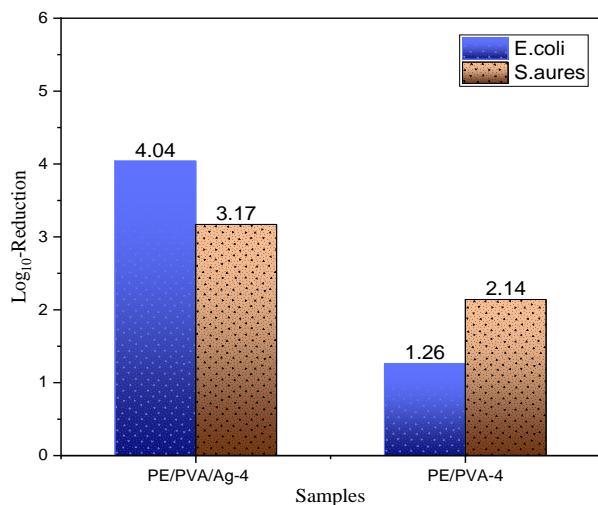


Figure 20. Log CFU/mL of coated filters against *E.coli*(E). And *S.aureus*(S) bacterias

4 Conclusions and suggestions

The objective of this research was to develop green, nature-based, eco-friendly, and antimicrobial fiber filters. The bio-synthesized silver nano particles were spherical in form and uniformly scattered on the fiber surfaces, according to SEM and EDS examination. FTIR outcomes also showed that green synthesized nano silvers and plant extracts broke the PVA chains and formed new bonds, and as a result, a successful coating material was produced. The existence of nano silvers generated by biosynthesis was proved by also XRD analysis. With the coating process, particles derived from plant extracts and nano silvers were homogeneously distributed on the fibers. As expected, modification of nano-silver and plant extracts has been shown to impart antibacterial properties to the filters. In addition, a high antibacterial effect was achieved with the coatings made using only plant extracts. In this way, the production of highly effective antibacterial filter papers that are harmless to the environment will be paved with the use of plant extracts. The performance tests of filter papers coated with plant extracts, nano silver and PVA were also higher than the other samples. The most important of these features is burst pressure resistance. Thus, while the service life of the filter papers will be increased, it will also provide antibacterial effects. As a result, it has been demonstrated that environmentally friendly nano silvers and plant extracts may be used to create antibacterial paper filters for industrial applications without the need of any hazardous chemicals.

Acknowledgment

Ondokuz Mays University provided funding for this study with PYO. MUH.1908.22.037 code. Performance tests in this study were performed at M.C. Filter Ltd. in Samsun/Turkey.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest

Similarity rate (iThenticate): 8%

References

- [1] A. Sabirova, S. Wang, G. Falca, P-Y Hong and S.P. Nunes, Flexible isoporous air filters for high-efficiency particle capture. *Polymer*, 213, 123278, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.123278>.
- [2] A. Sharma, S. Raj Kumar, V.K. Katiyar and P. Gopinath, Graphene oxide/silver nanoparticle (GO/AgNP) impregnated polyacrylonitrile nanofibers for potential application in air filtration. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 26, 100708, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2021.100708>.
- [3] L. Zhang, L. Li, L. Wang, J. Nie and G. Ma, Multilayer electrospun nanofibrous membranes with antibacterial property for air filtration. *Applied Surface Science*, 515, 145962, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145962>.
- [4] H.R. Byun, S.Y. Park, E.T. Hwang, B.I. Sang, J. Min, D. Sung, W. Choi, S. Kim and J. H. Lee, Antimicrobial air filter coating with plant extracts against airborne microbes. *Applied Sciences*, 10, 9120, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10249120>.
- [5] H. Liu, S. Zhang, L. Liu, J. Yu and B. Ding, A fluffy dual-network structured nanofiber/net filter enables high-efficiency air filtration. *Advanced Functional Materials*, 29, 1904108, 2019. <https://doi.org/10.1002/adfm.201904108>.
- [6] A. Wu, X. Hu, H. Ao, Z. Chen, Z. Chu, T. Jiang, X. Deng and Y. Wan, Rational design of bacterial cellulose-based air filter with antibacterial activity for highly efficient particulate matters removal. *Nano Select*, 3, 201–11, 2022. <https://doi.org/10.1002/nano.202100086>.
- [7] M. Sohrabi, M. Abbasi and A. Sadighzadeh, Fabrication and evaluation of electrospun polyacrylonitrile/silver nanofiber membranes for air filtration and antibacterial activity. *Polymer Bulletin (Berl)*, 1–19, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04311-1>.
- [8] C. Balagna, R. Francese, S. Perero, D. Lembo and M. Ferraris, Nanostructured composite coating endowed with antiviral activity against human respiratory viruses deposited on fibre-based air filters. *Surface Coating Technology*, 409, 126873, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126873>.
- [9] M.M. Abdelhamied, A. Atta, A.M. Abdelreheem, A.T.M. Farag and M.M. El Okr, Synthesis and optical properties of PVA/PANI/Ag nanocomposite films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31, 22629–4, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-04774-w>.
- [10] N.E. Kochkina and N.D. Lukin, Structure and properties of biodegradable maize starch/chitosan composite films as affected by PVA additions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 157, 377–84, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.154>.

- [11] T.S. Soliman, M.F. Zaki, M.M. Hessien and S.I. Elkalashy, The structure and optical properties of PVA-BaTiO₃ nanocomposite films. *Optical Materials*, 111, 110648, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110648>.
- [12] K. Park, S. Kang, J-W Park and J. Hwang, Fabrication of silver nanowire coated fibrous air filter medium via a two-step process of electrospinning and electrospray for anti-bioaerosol treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 411, 125043, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125043>.
- [13] A.K. Yontar, S. Çevik and O. Yontar, Green production of plant/collagen-based antibacterial polyvinyl alcohol (PVA) nanocomposite films. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 33, 101119, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101119>.
- [14] F. Aggestam and A. Giurca, The art of the “green” deal: policy pathways for the EU forest strategy. *Forest Policy and Economics*, 128, 102456, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102456>.
- [15] J.B. Skjærseth, Towards a European Green Deal: The evolution of EU climate and energy policy mixes. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 21, 25–41, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10784-021-09529-4>.
- [16] S. Anchan, S. Pai and H. Sridevi, T. Varadavenkatesan, R. Vinayagam and R. Selvaraj, Biogenic synthesis of ferric oxide nanoparticles using the leaf extract of *Peltophorum pterocarpum* and their catalytic dye degradation potential. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 20, 101251, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101251>.
- [17] R. Ahmad, Green Synthesis (Using Plant Extracts) of Ag and Au Nanoparticles. *GJN* 2017. <https://doi.org/10.19080/GJN.2017.02.555589>.
- [18] A.K. Yontar and S. Çevik, Effects of plant extracts and green-synthesized silver nanoparticles on the polyvinyl alcohol (PVA) nanocomposite films. *Arabian Journal of Science and Engineering*, 5, 1, 2023. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-07643-w>.
- [19] A.K. Yontar, S. Avcioglu and S. Çevik, Nature-based nanocomposites for adsorption and visible light photocatalytic degradation of methylene blue dye. *Journal of Cleaner Production*, 380, 135070, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135070>.
- [20] B. Farinon, R. Molinari, L. Costantini and N. Merendino, The seed of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.): nutritional quality and potential functionality for human health and nutrition. *Nutrients*, 12, 1935, 2020. <https://doi.org/10.3390/nu12071935>.
- [21] J. Zvezdanović, S. Petrović, S. Savić, D. Cvetković, L. Stanojević, J. Stanojević and A. Lazarević, Phenolics and mineral content in St. John’s wort infusions from Serbia origin: An HPLC and ICP-OES study. *Chemical Paper*, 75, 2807–17, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11696-021-01521-1>.
- [22] H. Hajlaoui, S. Arraouadi, E. Noumi, K. Aouadi, M. Adnan, M.A. Khan, A. Kadri and M. Snoussi, Antimicrobial, antioxidant, anti-acetylcholinesterase, antidiabetic, and pharmacokinetic properties of *Carum Carvi* L. and *Coriandrum Sativum* L. Essential Oils Alone and in Combination. *Molecules*, 2021. <https://doi.org/10.3390/molecules26123625>.
- [23] O. Prakash, G.N. Singh, R.M. Singh, S. Madan and S.C. Mathur, Interactions of herbal extract combinations against free radical scavenging activity. *Pharmaceutical Biology*, 47, 729–33, 2009. <https://doi.org/10.1080/13880200902939267>.
- [24] C.T. Che, Z.J. Wang, M. S. S. Chow and C.W.K. Lam, Herb-herb combination for therapeutic enhancement and advancement: Theory, practice and future perspectives. *Molecules*, 18, 5125–41, 2013. <https://doi.org/10.3390/molecules18055125>.
- [25] R.H. Ahmed and D.E. Mustafa, Green synthesis of silver nanoparticles mediated by traditionally used medicinal plants in Sudan. *International Nano Letter*, 10, 1–14, 2020. <https://doi.org/10.1007/s40089-019-00291-9>.
- [26] F. Jalilian, A. Chahardoli, K. Sadrajavadi, A. Fattahi and Y. hokoohinia, Green synthesized silver nanoparticle from *Allium ampeloprasum* aqueous extract: Characterization, antioxidant activities, antibacterial and cytotoxicity effects. *Advanced Powder Technology*, 31, 1323–32, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2020.01.011>.
- [27] T. Varadavenkatesan, R. Selvaraj and R. Vinayagam, Dye degradation and antibacterial activity of green synthesized silver nanoparticles using *Ipomoea digitata* Linn. flower extract. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 2395–404, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1850-4>.
- [28] A.K. Yontar and S. Çevik, Electrospray deposited plant-based polymer nanocomposite coatings with enhanced antibacterial activity for Ti-6Al-4V implants. *Progress in Organic Coatings*, 189, 107965, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107965>.
- [29] A.K. Yontar and S. Çevik, Bio-Synthesized Silver Nanoparticles Using *Cannabis Sativa* Seed Extracts and Its Anticancer Effects. *Plasmonics*, 160, 110313, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11468-023-02142-y>.
- [30] A.K. Yontar, S. Çevik and Ş. Akbay, Production of environmentally friendly and antibacterial MDF (Medium-density fiberboard) surfaces with green synthesized nano silvers. *Inorganic Chemistry Communications*, 159, 111865, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111865>.
- [31] N. Srikhao, P. Kasemsiri, A. Ounkaew, N. Lorwanishpaisarn, M. Okhawilai, U. Pongsa, S. Hiziroglu and P. Chindaprasirt, Bioactive nanocomposite film based on cassava starch/polyvinyl alcohol containing green synthesized silver nanoparticles. *Journal of Polymers and the Environment*, 29, 672–84, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01909-2>.
- [32] S.S. Bulla, R.F. Bhajantri and C. Chavan, Optical and structural properties of biosynthesized silver nanoparticle encapsulated PVA (Ag–PVA) films. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and*

- Materials, 31, 2368–80, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10904-021-01909-2>.
- [33] B.O. Aljohny, A.A.A. Almaliki, Y. Anwar, M. Ul-Islam and T. Kamal, Antibacterial and catalytic performance of green synthesized silver nanoparticles embedded in crosslinked PVA sheet. *Journal of Polymers and the Environment*, 29, 3252–62, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02110-9>.
- [34] H.M. Ragab and A. Rajeh, Structural, thermal, optical and conductive properties of PAM/PVA polymer composite doped with Ag nanoparticles for electrochemical application. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31, 16780–92, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-04233-6>.
- [35] Y.Z.N. Htwe and M. Mariatti, Fabrication and characterization of silver nanoparticles/PVA composites for flexible electronic application. In: 3rd International Postgraduate Conference on Materials, Minerals & Polymer (MAMIP), 20046, 2020. <https://doi.org/10.1063/5.0016135>.
- [36] A.W. Bauer, W.M. Kirby, J.C. Sherris and M. Turck, Antibiotic susceptibility testing by a standardized single disk method. *American Journal of Clinical Pathology*, 45, 493–6, 1966. https://doi.org/10.1093/ajcp/45.4_ts.493.
- [37] Y. Li, Y. Luan, W. Liu, C. Wang, H. Cao and P. Liu, Cellulose nanofibrils/polyvinyl alcohol/silver nanoparticles composite hydrogel: Preparation and its catalyst degradation performance of cationic dye. *Journal of Applied Polymer Science*, 139, 52246, 2022. <https://doi.org/10.1002/app.52246>.
- [38] Z.B. Mokhtari-Hosseini, A. Hatamian-Zarmi, S. Mahdizadeh, B. Ebrahimi-Hosseinzadeh, H. Alvandi and S. Kianirad, Environmentally-friendly synthesis of Ag nanoparticles by fusarium sporotrichioides for the production of PVA/Bentonite/Ag composite nanofibers. *Journal of Polymer and the Environment*, 8, 1, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10924-022-02509-y>.
- [39] N. Valarmathi, K. Sasikumar, S. Sumathi, A. Das and A.K. Jaiswal, In vitro biological activity of Zn substituted hydroxyapatite/ polyvinyl alcohol composite for orthopaedic applications. *Materials Today Communications*, 26, 102025, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102025>.
- [40] J. Guo, Q. Liu, J. Cheng, X. Fu, Y. Zhang, H. Yang, Hemostatic cotton based on biocompatible poly(vinyl alcohol)/soluble starch-fish skin collagen composites. *Materials Today Communications*, 32, 103812, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103812>.
- [41] A.B. García-Hernández, E. Morales-Sánchez, B.M. Berdeja-Martínez, M. Escamilla-García, M.P. Salgado-Cruz, M. Rentería-Ortega, R. R. Farrera-Rebollo, M. A. Vega-Cuellar and G. Calderon-Dominguez, PVA-based electrospun biomembranes with hydrolyzed collagen and ethanolic extract of hypericum perforatum for potential use as wound dressing: fabrication and characterization. *Polymers (Basel)*, 14, 10, 2022. <https://doi.org/10.3390/polym14101981>.
- [42] P.E. Antezana, S. Municoy, C.J. Pérez and M.F. Desimone, Collagen hydrogels loaded with silver nanoparticles and cannabis sativa oil. *Antibiotics (Basel)*, 10, 11, 2021. <https://doi.org/10.3390/antibiotics10111420>.
- [43] Y. He, H. Li, X. Fei and L. Peng, Carboxymethyl cellulose/cellulose nanocrystals immobilized silver nanoparticles as an effective coating to improve barrier and antibacterial properties of paper for food packaging applications. *Carbohydrate Polymers*, 252, 117156, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117156>.
- [44] M.F. Tahir, M.Z. Khan, S. Attacha, N. Asim, M. Tayyab, A. Ali, J. Militky and B. Tomkova, The comparative performance of phytochemicals, green synthesised silver nanoparticles, and green synthesised copper nanoparticles-loaded textiles to avoid nosocomial infections. *Nanomaterials (Basel)*, 12, 20, 2022. <https://doi.org/10.3390/nano12203629>.
- [45] S. Xie, B. Xu, L. Yuan, Y. Zhao, N. Ma, Y. Wang, D. Liu, A. Xiang, Y. Ouyang and H. Tian, Electrospun hydrophobic nanofiber films from biodegradable zein and curcumin with improved tensile strength for air filtration. *Journal of Polymers and the Environment*, 31, 287–96, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10924-022-02564-5>.
- [46] M. Samir, R.A. Geioushy, S. El-Sherbiny and O.A. Fouad, Enhancing the anti-ageing, antimicrobial activity and mechanical properties of surface-coated paper by Ag@TiO₂-modified nanopigments. *Environmental Science and Pollution Research International*, 29, 72515–27, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20935-2>.
- [47] D. Cheng, Y. Zhang, Y. Liu, X. Bai, J. Ran, S. Bi, Z. Deng, X. Tang, J. Wu, G. Cai and X. Wang, Mussel-inspired synthesis of filter cotton-based AgNPs for oil/water separation, antibacterial and catalytic application. *Materials Today Communications*, 25, 101467, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101467>.
- [48] Y. Xiao, Y. Wang, W. Zhu, J. Yao, C. Sun, J. Militky, M. Venkataraman and G. Zhu, Development of tree-like nanofibrous air filter with durable antibacterial property. *Separation and Purification Technology*, 259, 118135, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.118135>.
- [49] L. Wang, C. Hu and L. Shao, The antimicrobial activity of nanoparticles: present situation and prospects for the future. *International Journal of Nanomedicine*, 12, 1227-1249, 2017. <https://doi.org/10.2147/IJN.S121956>.





Protein adsorpsiyon çalışmaları için metal şelat grupları içeren pHEMA-GMA kolon dolgu malzemelerinin hazırlanması

Metal chelate for protein adsorption studies pHEMA-GMA column filling materials including groups preparation

Bahar Yılmaz Altınok^{1,*}, Mukaddes Keskinates², Mevlüt Bayrakçı³

^{1,3} Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, 70200, Karaman, Türkiye

² Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Kazım Karabekir Meslek Yüksekokulu, Çevre Koruma Teknolojileri Bölümü, 70100, Karaman, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, protein saflaştırılmasına yardımcı olacak yeni poly(HEMA-co-GMA) veya pHEMA-GMA destek katı yapıları hazırlandı. Hazırlanan pHEMA-GMA yapı malzemelerin yüzeyi IDA ve NTA gibi farklı fonksiyonel grupların bağlanması ile modifiye edildi. Modifiye edilen kriyojel yapılarından nikel (Ni II) metal iyonu geçirildi. Ni metali ile şelatlanan monolitik kriyojel yapısı SEM ve FT-IR ile karakterize edildi. Metal şelatlı kriyojel yapıların GFP floresan protein bağlama çalışmaları UV-vis ve floresan spektrofotometresi ile yapıldı. Bu kriyojellerin UV-vis ve floresan spektrofotometresi ile %45 ve %75 oranında protein bağladıkları tespit edildi. Ve bu sonuçlar SDS PAGE yöntemi ile görselleştirilerek desteklendi.

Anahtar kelimeler: p(HEMA-GMA), SDS page, Nikel, IDA, NTA

1 Giriş

Adsorpsiyon protein molekülünün kalitesini önemli derece etkileyen bir faktördür. Bu nedenle protein moleküllerinin adsorpsiyonu son yıllarda biyoloji, biyoteknoloji, biyokimya, biyomühendislik ve çevre bilimi gibi birçok alanda önemli rol oynamaktadır [1]. Protein adsorpsiyonunda kullanılacak malzemelerin yeniden kullanılması hem maddi hem de zaman bakımından oldukça kolaylık sağlayacaktır. Adsorpsiyon işlemlerinde kolon dolgu malzemeleri oldukça ilgi görmektedir. Başta proteinler olmak üzere biyolojik moleküllerin ayrılmasında yaygın olarak kullanılan kolon dolgu malzemeleri, tekrar tekrar kullanılabilirliği başta olmak üzere birçok avantaj sağlamaktadır [2,3]. Protein saflaştırma genel olarak tüm organizmadan, dokulardan, genellikle hücrelerden veya birkaç proteinden müteşekkil kompleks çözeltilerden istenilen polipeptidin izole edilerek elde edilmesi işlemlerine verilen isimdir.

Proteinlerin ayrılması ve saflaştırılmasında bugün birçok farklı gelişmiş teknik tercih edilmektedir. Bu tekniklerin tek başına veya birbiri ile bağlantılı olarak birkaçının birlikte kombine bir şekilde kullanılması ile hedeflenen proteini saf halde elde etmek mümkündür [4]. Kromatografinin proteinlerin saflaştırılması için kullanımı 1960'larda

Abstract

In this study, new poly(HEMA-co-GMA) or pHEMA-GMA support solid structures were prepared to help protein purification. The surface of the prepared pHEMA-GMA building materials was modified by binding different functional groups such as IDA and NTA. Nickel (Ni II) metal ion was passed through the modified cryogel structures. The monolithic cryogel structure chelated with Ni metal was characterized by SEM and FT-IR. GFP fluorescent protein binding studies of metal chelated cryogel structures were performed using UV-vis and fluorescence spectrophotometry. These cryogels were determined to bind 45% and 75% protein by UV-vis and fluorescence spectrophotometry. And these results were supported by visualization with the SDS PAGE method.

Keywords: p(HEMA-GMA), SDS page, Nickel, IDA, NTA

başlamıştır. Daha öncesinde proteinleri buldukları ortamdan ayırabilmek için küçük partiküllü sistemler kullanılmıştır [5]. Bu alanda en çok tercih edilen ayırma ve saflaştırma yöntemi afinite kromatografisidir. Afinite kromatografisi biyoafinite, immunoafinite, DNA afinitesi, lektin afinitesi, boronat afinitesi, biyomimetik afinite ve metal iyonu afinitesi gibi çeşitli alt dallara ayrılmaktadır [6,7]. Afinite kromatografisi için yapısında hem metal şelatlaştırıcı ajan hem de kriyojel yapımında kullanılacak yeni monomerler ilgi görmektedir [8, 9].

Kriyojel yapımında kullanılacak monomerler ile protein yapıları üzerinde bulunan imidazol halkaları arasında güçlü bir koordinasyon oluşturulabilmesi hedeflenmiş ve başarılı sonuçlar alınmıştır [10, 11, 12]. Bu çalışmalar ışığında etkili bir ayırma yapması için kolon malzemeleri Pb²⁺, Co²⁺, Cu²⁺ ve Ni²⁺ gibi farklı geçiş metali ile uygun şartlarda şelatlandırılıp yeni immobilize metal afinite kolonlar hazırlanmaktadır [13]. Ardından hedef protein kolonlara yüklenmekte ve farklı tamponların hareketli faz olarak kullanılması ile saflaştırma işlemleri gerçekleştirilmektedir [14]. Kriyojel esaslı malzemeler sahip oldukları büyük gözenek çaplarından (genelde 10-200 µm) dolayı düşük geri basınç ve direnç (kütle transferine karşı) gösterme gibi avantajları olmasına rağmen, bu durum proteinlere karşı

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: bahar.kmu@gmail.com (B. Yılmaz Altınok)

Geliş / Received: 27.10.2023 Kabul / Accepted: 18.01.2024 Yayınlanma / Published: 15.04.2021

doi: 10.28948/ngumuh.1382364

düşük kapasite sergileme gibi bir dezavantaja yol açmaktadır [15, 16]. Kolonların ayırma yetenekleri, son zamanlarda en popüler proteinlerden biri olan yeşil floresan proteine (GFP) karşı araştırılmaktadır.

Yeşil floresan protein (GFP), mavi ila ultraviyole aralığında ışığa maruz kaldığında parlak yeşil floresan sergileyen 238 amino asitten (26,9 kDa) oluşan bir proteindir. Yeşil renkte parlayan benzer proteinler birçok deniz organizmasında bulunur [14]. GFP, hayvanlara veya diğer türlere transgenik tekniklerle aktarılabilir ve aktarıldığı genomlarda ve yavrularının genomunda tutulabilir. Bugüne kadar GFP, insan hücreleri dahil olmak üzere bakteriler, mayalar, mantarlar, balıklar ve memeliler dahil olmak üzere birçok türde ifade edilmiştir [11].

Bu çalışmada, poli(HEMA-GMA) monomerler yüzeyleri aktifleştirilmek için IDA ve NTA ile modifiye edildi. Modifiye edilen kriyojel yapılardan Ni metali geçirilerek şelatlanma işlemi gerçekleştirildi. GFP'nin adsorpsiyonu ve saflaştırılması için bu metal şelatlı yapılar ilk kez kullanıldı. İlk kez kullanılan bu yapılar için adsorpsiyon koşulları sağlanarak metal grupları üzerindeki bağlanma mekanizmaları değerlendirildi. GFP'nin başlangıç konsantrasyonundaki adsorpsiyon dengesi, bir dizi toplu deneyde elde edildi. Deneysel veriler, farklı adsorpsiyon modelleri açısından analiz edilerek değerlendirildi. Son olarak, GFP'nin saflaştırılması UV, floresan spektrofotometresi ve SDS PAGE ile belirlendi.

2 Materyal ve metot

2.1 Materyal

2-hidroksietil metakrilat (HEMA), Glisidil metakrilat (GMA), Nikel metali, İmmino diasetik asit (IDA) ve Nitroliotriasetik asit (NTA) Merck ve Sigma'dan temin edildi.

2.2 Yöntem

2.2.1 Metal immobilize monolitik kriyojellerin hazırlanması

1,3 ml HEMA ve 100 µl GMA ile 0,283 g MBAAm 10 ml suda birbirine karıştırılarak çözündürüldü. Üzerine 20 mg APS ve ardından 25 µl TEMED eklendi. Reaksiyon 1 dk karıştırıldı. Elde edilen karışım hemen plastik bir şırıngaya alındı (Havasız şekilde). Karışım -12 0 C'de 24 saat inkübe edildi. 24 saatin sonunda -12 0 C den alınan kriyojeller 2 saat oda sıcaklığında bekletildi [17]. Reaksiyona girmeyen monomerleri ve başlatıcıları uzaklaştırılmak için elde edilen kriyojeller 200 ml su ile 3 kez yıkandı. Şelatlama maddesi IDA'nın kovalent immobilizasyonu 6 saat boyunca 75 0 C'de peristaltik bir pompa yardımıyla kriyojelden 50 ml IDA solüsyonu geçirilerek gerçekleştirildi. Reaksiyona girmemiş IDA %5'lik asetik asit solüsyonu ve su ile ard arda yıkandı. Elde edilen IDA ve NTA immobilize kriyojellerine Ni metali ile şelatlanma işlemi uygulandı. Sırasıyla IDA- ve NTA-kriyojele Ni²⁺ iyonları yüklendi. Ni şelatasyonu 2 saat boyunca 25 0C de peristaltik pompa kullanılarak kriyojelden 100 ml Ni(II) solüsyonu geçirilerek gerçekleştirildi [8].

2.2.2 Hazırlanan kriyojellerin karakterizasyonu

2.2.2.1 Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

IDA ve NTA ile modifiye edilmiş pHEMA-GMA kriyojellerin morfolojisi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelendi. SEM görüntüleri alınacak kriyojel numuneleri öncelikle 5 nm Au ile kaplandı. Kaplanan kriyojeller yaklaşık 1 mikron mesafeden SEM ile görüntülenerek rapor edildi [17].

2.2.2.2 Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR)

Kolon dolgu maddesi olarak hazırlanan dört farklı kriyojel yapısı ve bu kriyojel yapılarından protein geçirilen yapıların FT-IR sonuçları, Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopik (FT-IR) teknikler ile analiz edildi. FT-IR spektroskopisi, protein molekülünü ve farklı kriyojel yapıları arasındaki olası etkileşimlerini kanıtlamak için 4000-400 cm⁻¹ arasında taramalar gözden geçirildi ve elde edilen spektrumlar rapor edildi [16].

2.2.3 Adsorpsiyon ve floresan çalışmaları

Çalışma kapsamında hazırlanan kriyojel kolonların kromatografik uygulamaları proteinlerin ayrılmasında ve saflaştırılmasında kullanılan adsorpsiyon tekniklerinden yararlanılarak yapıldı [18]. Seçilen kolon dolgu malzemesinin protein bağlama verimliliği incelendi. Öncelikle immobilize metal kriyojel kolonu; uygun çaplarda kesilerek 20 mM fosfat, 50 mM NaCl pH:8 tamponu ile yıkanarak denge haline getirildikten sonra derişik 20 mL GFP (25 µL) içeren çözeltiye ilave edilerek oda sıcaklığında ve bir saat süreyle 175 rpm etkileştirildi. UV-Vis spektrofotometresinde (Shimadzu UV 1800) adsorpsiyon öncesinde ve sonrasında 476 nm dalga boyunda ölçülen GFP'ye ait absorbans değerleri kullanılarak tutunan protein miktarı tespit edildi. Ayrıca kolondan geçirilen GFP proteini UV ve gün ışığında görüntülenerek kaydedildi [4, 19, 20].

Ayrıca; IDA, NTA ve bunların metal şelatlı kriyojellerini içeren kolonlardan geçirilen GFP floresan proteinin floresan yoğunluğu floresan spektrofotometresi (Hitachi F-7100) kullanılarak ölçüldü.

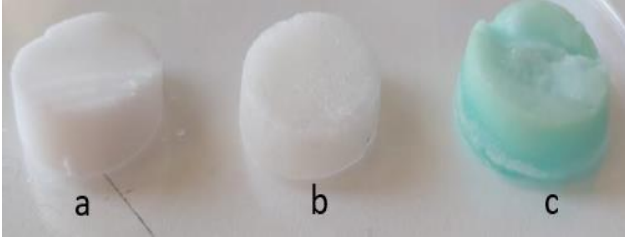
2.2.4 Sodyum dodesil sülfat poliakrilamid jel elektroforezi (SDS-PAGE)

SDS-PAGE (sodyum dodesil sülfat-poliakrilamid jel Elektroforez), proteinlerin moleküler kütlelerine göre ayırımına izin veren bir yöntemdir. Aynı zamanda matriks olarak bilinen medyum poliakrilamid temelli devamsız bir jeldir. Buna ek olarak, SDS kullanılır. Yaklaşık 1.4 gram SDS 1 gram proteine bağlanır, yani her bir aminoasite 2 SDS molekülü bağlanmış olur. SDS yüzey aktif madde olarak davranır, proteinlerin kendi taşıdıkları yüklerin üzerini kaplar ve böylece proteinlerin kendi yükleri kaybolmuş ve ayırım yük temelinde gerçekleşmemiş olur. Ayrıca pozitif yükler de ayırma jelinin bazik pH'ı ile yüksek oranda indirgenir. Belli bir elektrik alanının varlığında proteinler anottan katoda doğru ilerlerler bu ilerlemenin hızı moleküler kütlelerin büyüklüğü ile değişir. Bu basit prosedür proteinlerin moleküler kütle temelinde hassas ayırımına olanak sağlar.

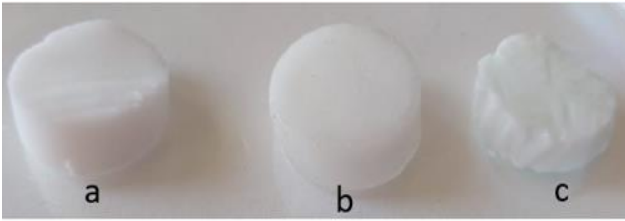
SDS PAGE yöntemi ile kolondan geçirilen protein yürütüldü ve kaydedildi [8].

3 Bulgular ve tartışma

Bu çalışmada da GFP proteini için Ni şelatlı IDA ve NTA kriyojelleri hazırlandı. Elde edilen kriyojel yapıları Şekil 1'de saf pHEMA, IDA bağlı pHEMA ve Ni metali ile şelatlanmış IDA bağlı pHEMA ve Şekil 2'de saf pHEMA, NTA bağlı pHEMA ve Ni metali ile şelatlanmış NTA bağlı pHEMA olarak görselleştirilmiştir.



Şekil 1. Kriyojel yapısı (a. pHEMA kriyojel b. IDA-pHEMA Kriyojel c. IDA-Ni-pHEMA Kriyojel)

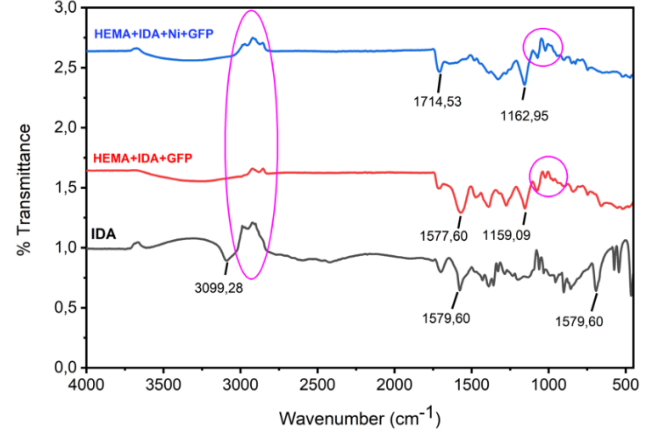


Şekil 2. Kriyojel yapısı (a. pHEMA kriyojel b. NTA-pHEMA Kriyojel c. NTA-Ni-pHEMA Kriyojel)

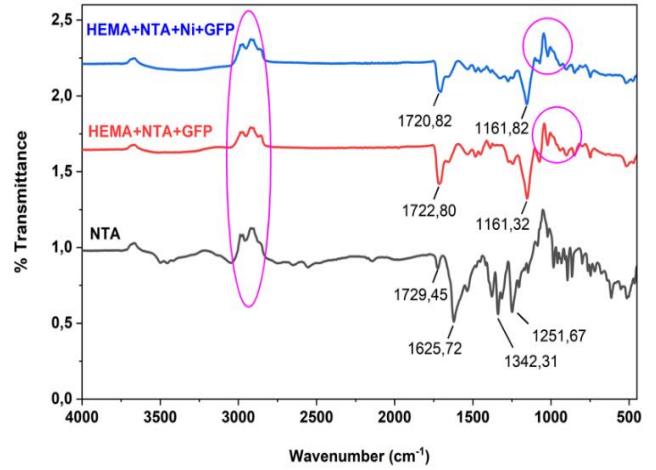
Hazırlanan IDA ve NTA modifiyeli pHEMA kriyojelleri FT-IR ve SEM ile incelendi. FT-IR çalışması, farklı yapılardaki kriyojellerin yapısal özelliklerindeki değişiklikleri ve/veya bu kriyojellere protein bağlanması üzerine yapı karakterizasyonu açıklamak için yapıldı. Protein-kriyojel etkileşimlerinin oluşturduğu yeni spektrumlar, proteinin kriyojelle bağlandığını gösteren bir kanıt olarak rapor edildi. Serbest IDA, HEMA+IDA, Ni-IDA+HEMA, NTA, HEMA+NTA ve Ni-NTA+HEMA etkileşiminin FT-IR spektrumları Şekil 3 ve Şekil 4'de gösterilmiştir. Şekillere bakıldığında, serbest IDA ve NTA kriyojellerinde 3099 cm⁻¹ civarında meydana gelen piklerin GFP proteinin bağlanması ile pik şiddetinde ciddi bir azalma olduğu açıkça görülmektedir. Serbest GFP proteininin 3000 cm⁻¹ civarındaki amino bandının, kriyojel ile bağlanması sonucu kaybolduğunu da göstermektedir [10]. Serbest IDA ve NTA kriyojellerinin 1700 ve 500 cm⁻¹ dalga boyu arasında verdiği farklı pik değerlerinin, protein bağlandığında kaydığı ve pik değerinin oldukça azaldığı gözlemlendi [10, 15]. Bu durum açıkça, GFP floresan proteininin kriyojel yapıları ile etkileşim içinde olduğunu göstermektedir.

Kriyojellerin yüzey morfolojisi, FT-IR ölçümlerindeki değişimleri desteklemek amacıyla SEM ile de ölçüldü. FT-IR araştırmasının sonuçlarının SEM analiz sonuçları ile yakından bağlantılı olduğu bilinmektedir. Kriyojel yapıları SEM görüntüsünde genellikle boşluklu, pürüzlü ve dağınık

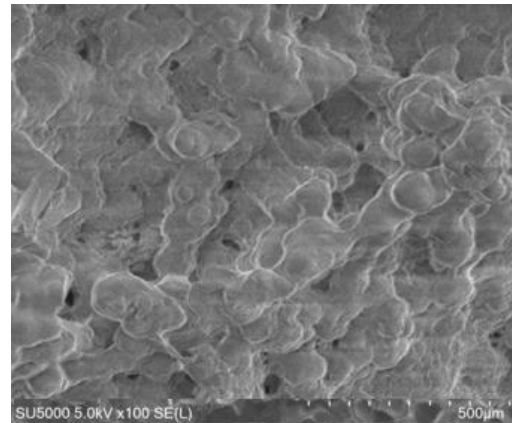
yapılar göstermektedir. Şekil 5'de ve Şekil 6'da görüldüğü üzere IDA kriyojel yapısı NTA kriyojel yapısına oranla daha dalgalı ve pürüzlü bir yapıya sahiptir. NTA yapısı ise daha az yoğunlukta dalgalı bir morfolojik yapı yani daha az pürüzlü yapı içermektedir. Bu morfolojik yapı farklılıkları kriyojellerin protein bağlama kapasitesiyle birebir doğru orantılı olabilir.



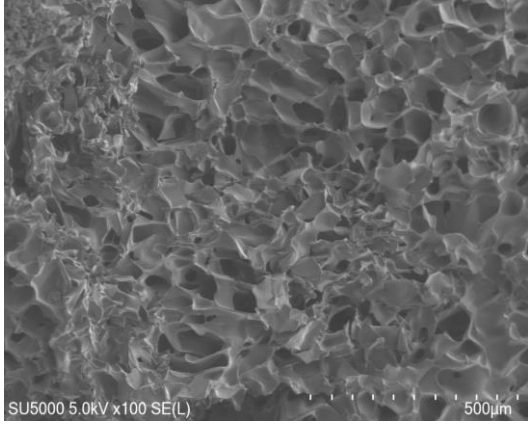
Şekil 3. IDA ve IDA+Ni kolonundan geçen GFP'nin FTIR grafiği



Şekil 4. NTA ve NTA+Ni kolonundan geçen GFP'nin FTIR grafiği

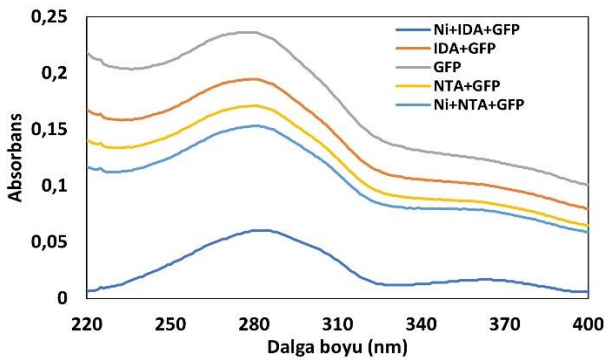


Şekil 5. IDA Kriyojelin SEM görüntüsü



Şekil 6. NTA Kriyojelin SEM görüntüsü

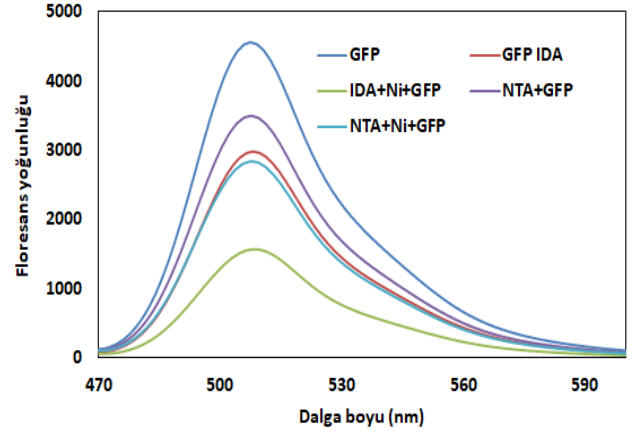
Karakterizasyonu tamamlanan IDA ve NTA kriyojellerin metal şelatlı yapılarından GFP proteini geçirilerek adsorpsiyon çalışmaları yapıldı. GFP proteinin farklı modifiyeli kolonlardan geçirilerek 280 nm’de protein bağlama oranları adsorpsiyon değerleri ölçülerek hesaplandı. Bunun için, 280 nm’de absorbans değerleri UV-vis spektrofotometresi ile ölçüldü. Sonuçlara bakıldığında protein yoğunluğu dikkate alınarak kolon dolgu malzemelerinin GFP proteini bağlama kapasitesi karşılaştırıldı [14, 15]. Şekil 7’deki grafiğe bakıldığında Ni şelatlı kolon dolgu maddelerinin daha fazla protein bağladığı 280 nm’de meydana gelen absorbans değerindeki azalma ile tespit edildi. Ayrıca, Ni metali şelatlı NTA ve IDA kriyojelinin 280 nm’deki absorbans değeri NTA ve IDA kriyojeline nazaran daha düşük kaydedildi. Bu sonuç nikel şelatlı kriyojelin GFP protein bağlama kapasitesinin metal şelat içermeyen kriyojellere oranla daha yüksek olduğunu açıkça göstermektedir. Ni şelatlı NTA kriyojelinin yaklaşık %45 oranında protein bağladığı, Ni şelatlı IDA kriyojelinin ise %75 oranında protein bağladığı 280 nm’deki absorbans değerlerinden belirlendi.



Şekil 7. Ni şelatlı IDA ve NTA p(HEMA) kriyojellerinden geçirilen GFP floresan proteinin UV-vis spektrofotometre grafiği

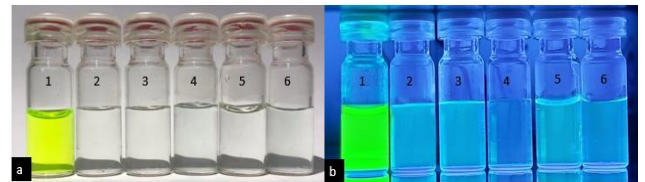
Floresan spektrofotometresi kullanılarak alınan protein konsantrasyonundaki ölçümde meydana gelen azalma UV sonuçlarını desteklemektedir (Şekil 8). Floresan ölçüm sonuçlarına bakıldığında metal şelatlı kriyojellerden geçirilen GFP proteininin floresan değerleri metal şelat içermeyen

kriyojellere oranla daha düşüktür. Kolondan geçirilmeyen GFP proteininin emisyon değeri yaklaşık 4500 cm^{-1} civarında alınırken, Ni şelatlı kriyojellerden geçirilen GFP proteininin floresan yoğunluğunda yaklaşık %50 ve %75 oranında azalma meydana geldiği gözlemlendi. Bu azalma, Ni şelatlı kriyojellerin GFP floresan proteini bağlama kapasitesinin daha fazla olduğunu kanıtlamaktadır (Şekil 8).



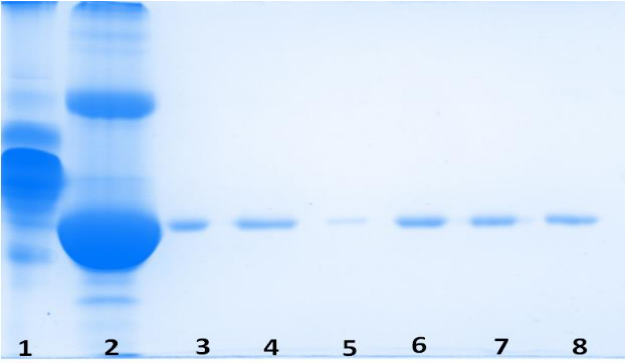
Şekil 8. Ni şelatlı IDA ve NTA p(HEMA) kriyojellerinden geçirilen GFP floresan proteinin floresan spektrofotometre grafiği

IDA+Ni ve NTA+Ni kriyojel kolonlardan geçirilen GFP floresan proteininin hem UV hem de gün ışığında görüntüleri alındı (Şekil 9). Şekil 9’a bakıldığında kolondan geçirilmeyen protein (1) geçirilen proteinlere kıyasla hem UV hemde gün ışığında belirgin olarak farklılık göstermektedir. 4 numaralı şişede Ni-IDA kriyojeli içeren kolondan geçirilen protein bulunmaktadır. Nikel şelatlı IDA kriyojeli diğer kriyojellere oranla daha fazla protein yakalamıştır. Bu durum metal şelatların protein bağlama kapasitesini arttırdığını açıkça göstermektedir. İlk kez bu çalışma kapsamında yapılan Ni şelatlı NTA kriyojeli (6) ise metal şelatlı olmayan NTA (5) kriyojeline oranla daha fazla GFP proteini bağladığı gözle görülecek derecede fark edilmektedir. Bu sonuçlar, ilk kez yapılan Ni şelatlı kolon dolgu malzemelerinin protein saflaştırmada oldukça önem kazanacağını desteklemiştir.



Şekil 9. GFP proteininin kolondan geçirilmeden önce ve sonra; gün ışığı (a) ve UV ışığı (b) altındaki görüntüsü (a.1. Derişik GFP a.2. Seyreltilmiş GFP a.3. IDA yüklü kolondan geçirilen GFP miktarı a.4. IDA+Nikel yüklü kolondan geçirilen GFP miktarı a.5. NTA yüklü kolondan geçirilen GFP miktarı a.6. NTA+Nikel yüklü kolondan geçirilen GFP miktarı, b fotoğrafı da aynı miktarların UV ışık altındaki görüntüsüdür.)

Hazırlanan kolon dolgu maddesinin GFP floresan proteinini bağlaması için yapılan adsorpsiyon ve floresan çalışmaları kaydedildi. Bu çalışmaları desteklemek amacıyla SDS PAGE yapıldı. GFP floresan proteini ve kolondan geçirilen GFP proteini SDS PAGE’de yürütüldü ve sonuçları Şekil 10’da sunuldu. Sonuçlara bakıldığında serbest ve Ni şelatlı IDA ve NTA kriyojel içeren kolonlardan geçirilen GFP floresan protein derişimine bağlı olarak bant kalınlığı ile açıklanmaktadır. 3. sırada kolondan geçirilmek üzere hazırlanan GFP proteini bulunurken, 4 ve 5’de IDA ve Ni-IDA kriyojelleri içeren kolonlardan geçirilen GFP proteini bulunmaktadır. Ni metali şelatlı IDA kriyojeli GFP proteini bağlama kapasitesi daha yüksek olduğu meydana gelen bandın yoğunluğundan açıkça belli olmaktadır. Bandın daha az yoğun olması protein miktarının azaldığını açıkça göstermektedir. Ayrıca 6. sırada kolondan geçirilmek üzere hazırlanan GFP proteini bulunurken 7 ve 8 numaralı kuyucukta NTA ve Ni-NTA kriyojel içeren kolonlardan geçirilen GFP proteini yürütülmüştür. 6 numaralı bandın 7 ve 8 numaralı banda nazaran daha yoğun olduğu görülmektedir. Ni şelatlı kriyojellerin serbest IDA ve NTA içeren kriyojelleri kıyasla daha fazla protein bağladığı tekrar belirlenmiştir.



Şekil 10. GFP proteininin kolondan geçirildikten önce ve sonra SDS page görüntüsü (1. GFP, 2. Boyalı GFP, 3. Seyreltilmiş GFP, 4. IDA’lı kolondan geçirilen GFP, 5. Ni-IDA’lı kolondan geçirilen GFP, 6. Seyreltilmiş GFP, 7. NTA’lı kolondan geçirilen GFP, 8. Ni-NTA’lı kolondan geçirilen GFP)

4 Sonuçlar

Protein saflaştırma işlemlerinde elde edilmek istenilen proteininin diğerlerinden ayrılması yoğunlukla kromatografik metotlarla yapılmaktadır. Saflaştırma işlemlerinde benzer özellik gösteren moleküllerin birbirinden ayrılması araştırmacıların karşılaştıkları en büyük zorluklardan biridir. Genellikle protein saflaştırma işlemlerinde proteinin saf bir şekilde elde edilebilmesi için iki veya daha fazla kromatografik sürecin ard arda yürütülmesi gerekmektedir, bu da verim ve aktivite kayıplarına yol açmaktadır. Rekombinant olarak elde edilen proteinlerde bu sorun genellikle bir afinite Tag’ının polipeptid zincirine ilave edilmesi sayesinde tek basamakta ve yüksek verimde saflaştırma yapılabilen afinite kromatografisiyle aşılmaktadır [11]. Bu amaçla en yaygın olarak kullanılan afinite kromatografi rezinleri arasında Ni-NTA Agaroz,

Talon, GST gibi rezinler bulunmaktadır. Bu rezinler arasında metal afinite temelli kolon dolgu malzemeleri çoğunlukla tercih edilmektedir. Protein saflaştırma kolonlarında güçlü metal bağlayıcı şelatların reçine yüzeyinde bulunması, reçinelerin afinite temelli protein saflaştırılmasında yüksek verim ve seçicilik sağlamaktadır [5, 14]. Dolayısı ile önerilen bu çalışma kapsamında; yapısında Nikel (Ni²⁺), Bakır (Cu²⁺) ve/veya Kobalt (Co²⁺) gibi geçiş elementleri ile güçlü metal şelat kompleks yapıları oluşturabilen NTA ve IDA ile modifiye edilmiş ve Ni metali ile şelatlanmış yeni kriyojeller hazırlandı. Bu işlem için, düşük sıcaklık ile jelleşme yöntemi uygulanarak 4 farklı metal afinite temelli monolitik kolon hazırlandı ve karakterize edildi. Saflaştırma işlemleri için rekombinant His- Tagged yeşil floresan protein (6xHis-GFP) araştırıldı.

Elde edilen farklı kriyojeller ile GFP proteini bağlama sonuçları karşılaştırıldığında metal şelatlı kriyojellerin, saf kriyojellere oranla daha fazla olduğu açıkça görülmüştür. Ni şelatlı NTA ve IDA modifiyeli kriyojeller sırayla %45 ve %75 oranla GFP proteini bağlamıştır. Sonuç olarak, bu başarı kriyojellerin ticari olarak kullanılmasını hedeflemektedir.

Teşekkür

“Bu araştırma Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonunca kabul edilen 06-M-21 nolu proje kapsamında desteklenmiştir” 06-M-21 numaralı bu projeye destek veren Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu’na teşekkür ederiz.

Saflaştırma işleminde kullanılan yeşil floresan proteininin (GFP) temininden dolayı Yakup ULUSU’ya teşekkür ederiz.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %11

Kaynaklar

- [1] H. Alkan, N. Bereli, Z. Baysal, A. Denizli, Antibody purification with protein A attached supermacroporous poly (hydroxyethyl methacrylate) cryogel. *Biochemical Engineering Journal*, 45(3), 201-208, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2009.03.013>
- [2] A. Baimenov, D. A. Berillo, S. G. Pouloupoulos, V. J. Inglezakis, A review of cryogels synthesis, characterization and applications on the removal of heavy metals from aqueous solutions. *Advances in colloid and interface science*, 276, 102088, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.102088>
- [3] M. Bakhshpour, A. Derazshamshir, N. Bereli, A. Elkak, A. Denizli. [PHEMA/PEI]-Cu (II) based immobilized metal affinity chromatography cryogels: application on the separation of IgG from human plasma. *Materials Science and Engineering: C*, 61, 824-831, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.01.005>
- [4] M. Bayrakçı, B. Yılmaz, Biyoaktif giemsa boyama ajanı ile suda çözünen sulfonato kaliksaren moleküllerinin etkileşiminin spektrofotometrik olarak

- incelenmesi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 9(2), 985-992, 2019. <https://doi.org/10.21597/jist.439066>
- [5] N. S. Bibi, N. K. Singh, R. N. Dsouza, M. Aasim, M. Fernández-Lahore, Synthesis and performance of megaporous immobilized metal-ion affinity cryogels for recombinant protein capture and purification. *Journal of Chromatography A*, 1272, 145– 149, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2012.11.036>
- [6] B. M. A. Carvalho, L. H. M. Da Silva, L. M. Carvalho, A. M. Soares, L. A. Minim, S. L. Da Silva, Microcalorimetric study of the adsorption of lactoferrin insupermacroporous continuous cryogel with immobilized Cu²⁺ ions. *Journal of Chromatography A*, 1312, 1– 9, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2013.08.042>
- [7] M. B. Dainiak, F. M. Plieva, I. Y. Galaev, R. H. Kaul, B. Mattiasson, Cell Chromatography: Separation of Different Microbial Cells Using IMAC Supermacroporous Monolithic Columns. *Biotechnology Progress*, 21, 644-649, 2005. <https://doi.org/10.1021/bp049615g>
- [8] N. Eczacioglu, B. Yılmaz, Y. Ulusu, M. Bayrakci, Recovery and reusability of apounag fluorescence protein from the unconjugated bilirubin complex structure. *Journal of Fluorescence*, 30(3), 497-503, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10895-020-02519-w>
- [9] K. Erol, B. K. Cebeci, K. Köse, D. A. Köse, Effect of immobilization on the activity of catalase carried by poly (HEMA-GMA) cryogels. *International journal of biological macromolecules*, 123, 738-743, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.121>
- [10] I. Guven, O. Gezici, M. Bayrakci, M. Morbidelli, Calixarene-immobilized monolithic cryogels for preparative protein chromatography. *Journal of Chromatography A*, 1558, 59–68, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2018.05.026>
- [11] A. Hanora, F. Bernaudat, F. M. Plieva, M. B. Dainiak, L. Bülow, I. Y. Galaev, B. Mattiasson, Screening of peptide affinity tags using immobilised metal affinity chromatography in 96-well plate format. *Journal of Chromatography A*, 1087, 38–44, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2005.04.029>
- [12] S. A. A. Noma, Ö. Acet, A. Ulu, B. Önal, M. Odabaşı, B. Ateş, l-asparaginase immobilized p (HEMA-GMA) cryogels: A recent study for biochemical, thermodynamic and kinetic parameters. *Polymer Testing*, 93, 106980, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.polymeresting.2020.106980>
- [13] J. Porath, J. Carlsson, I. Olsson, G. Belfrage, Metal chelate affinity chromatography, a new approach to protein fractionation. *Nature*, 258, 598- 599, 1975.
- [14] J. Sarkar, A. Kumar, Immobilized metal affinity cryogel-based high-throughput platform for screening bioprocess and chromatographic parameters of His6-GTPase. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 409, 2951–2965, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00216-017-0242-9>
- [15] B. Wan, J. Li, F. Ma, N. Yu, W. Zhang, L. Jiang, H. Wei, Preparation and properties of cryogel based on poly (2-hydroxyethyl methacrylate-co-glycidyl methacrylate). *Langmuir*, 35(9), 3284-3294, 2019.: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b04021>
- [16] B. Yılmaz, Spektroskopik Teknikler Kullanılarak Furosemid ile DNA Etkileşimlerinin İncelenmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(2), 325-331, 2021. doi: <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.856526>
- [17] B. Yılmaz, Release of nifedipine, furosemide, and niclosamide drugs from the biocompatible poly (HEMA) hydrogel structures. *Turkish Journal of Chemistry*, 46(5), 1710-1722, 2022. <https://doi.org/10.55730/1300-0527.3474>
- [18] Y. Şimşek, Sulu çözülden bakır (II) adsorpsiyon sürecinin optimizasyonunda yüzey yanıt metodolojisinin uygulanması. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 6(3), 182-191, 2018. <https://doi.org/10.21541/apjes.393848>
- [19] M. Bayrakci, B. Yılmaz, DNA ile Bağlanabilen Suda Çözünür Sülfonato Kaliks [8] Aren Sentezi ve Antimikrobiyal Aktivitesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(1), 615-620, 2019. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.517209>
- [20] M. Keskinates, B. Yılmaz, Y. Ulusu, M. Bayrakci, Electrospinning of novel calixarene-functionalized PAN and PMMA nanofibers: Comparison of fluorescent protein adsorption performance. *Materials Chemistry and Physics*, 205, 522-529, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.11.055>





Evrişimli sinir ağları kullanılarak ince kesit görüntülerden hidrotermal alterasyon türlerinin sınıflandırılması

Classification of hydrothermal alteration types from thin section images using convolutional neural networks

Rıza Çenet¹ , Emre Ünsal^{2,*} , Oktay Canbaz³ 

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü., 58140, Sivas, Türkiye

² Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas, Türkiye

³ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas, Türkiye

Öz

Hidrotermal alterasyon, değerli madenlerin arama aşamalarında kullanılan önemli bir jeolojik özelliktir. Bu araştırma, mikroskop görüntülerinde hidrotermal alterasyon türlerini tanımlamak için oluşturulan iki farklı derin öğrenme ağı yapısına odaklanmaktadır. 2500 görüntüden oluşan veri setinin, %70'i ağı eğitilmesinde, %20'si ağı test edilmesinde ve %10'u ağı geçerliliğinin ölçülmesinde kullanılmıştır. Evrişimli Sinir Ağı (ESA) ve Xception modelleri, Adam, RMSprop ve SGD optimizasyon fonksiyonları kullanılarak eğitilmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. ESA modeli için Adam ve SGD optimizasyon fonksiyonları %96 doğru sınıflandırma yaparak, en başarılı sınıflandırmayı gerçekleştirmiştir. Xception modeli için en yüksek doğruluk değeri %98 ile Adam ve RMSprop optimizasyon fonksiyonları kullanılan ağlarda gerçekleşmiştir. Her ne kadar Xception modeli daha yüksek doğruluk değerlerine sahip olsa da ağı eğitim süresi göz önüne alındığında ESA modelinin işlemi çok daha hızlı tamamladığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Hidrotermal alterasyon, İnce kesit, Derin öğrenme, CNN, Sınıflandırma

1 Giriş

Makine öğrenmesi ve derin öğrenme modelleri, günümüzde gelişen bilgisayar teknolojisinin önemli çalışma alanları içerisinde yer almaktadır. Makine öğrenmesinin en çok kullanılan alanlarından bir tanesi nesne tanımlama ve sınıflandırmadır. Tanıma veya sınıflandırma işlemi nesnelerin renk, doku veya boyut gibi ayırt edici özellikleri kullanılarak gerçekleştirilir. Bir nesnenin hangi özelliğinin önemli olduğunu belirlenmesi ve ona göre ayarlanma yapılması oldukça zahmetli bir süreçtir. Ayrıca bir nesne için önemli olan özelliklere göre tasarlanan öğrenme ağı başka bir nesne için işe yaramaz. Tang vd. [1] Evrişimli Sinir Ağı (ESA)'nda, nesnelerin önemli özelliklerini bir insanın belirlemesine ihtiyaç duymadan, ağı kendisi belirlemektedir. Bu da bütün nesneler için ek ayarlamalara gerek kalmadan belli bir modelin kullanılmasına olanak sağlar. Bu sayede ESA, çok büyük verilerde ve farklı disiplinlerde, yüksek doğruluk oranları ile sınıflandırma

Abstract

Hydrothermal alteration is an important geological feature used in the exploration stages of precious minerals. This research focuses on two distinct deep-learning network structures created to identify hydrothermal alteration types in microscope images. A dataset of 2500 images, 70% of this data set was used to train, 20% to test, and 10% to measure the validity of the network. Convolutional Neural Network (CNN) and Xception models were trained using Adam, RMSprop and SGD optimization functions and the results are discussed. The Adam and SGD optimization functions for the CNN model performed the most successful classification with 96% accuracy. In the case of the Xception model, the highest accuracy value was 98% for the networks using the Adam and RMSprop optimization functions. Although the Xception model had higher accuracy values, it was observed that the CNN model completed the process significantly faster considering the training time of the network.

Keywords: Hydrothermal alteration, Thin section, Deep learning, CNN, Classification

yapabilir. ESA'nın bu özellikleri sayesinde farklı çalışma alanlarında yüksek doğrulukta öğrenme değerleri elde edilebilmektedir. Son yıllarda literatürde yer bilimlere [2], [3] ve sağlık alanı [4], [5] gibi farklı disiplinlerde çeşitli çalışmalarda makine öğrenmesi ve derin ağlar kullanılarak başarılı sonuçlar elde edilmektedir.

Değerli metalik/metalik olmayan maden yatakları ülke ekonomileri için önemli katkı sağlamaktadırlar. Bu çalışma, maden yataklarının keşfinde önemli adımlardan bir tanesini oluşturan hidrotermal alterasyonları konu almaktadır. Bu alterasyonlar, sıcak sulu çözeltilerin değişen fiziko-kimyasal koşullar altında geçtikleri kayalarla etkileşimi, mineralojik, kimyasal ve dokusal değişiklikleri içeren karmaşık bir süreç olan hidrotermal alterasyon zonlarının gelişimiyle sonuçlanır [6]. Hidrotermal alterasyon, yer kabuğunun derinliklerinde gömülü olan porfiri tip, düşük ve yüksek sülfidasyonlu epitermal altın yatakları gibi değerli metaller ve baz metaller içeren büyük hidrotermal maden yataklarının tespitinde önemli adımlardan bir tanesini oluşturmaktadır.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: eunsal@cumhuriyet.edu.tr

Geliş / Received: 13.09.2023 Kabul / Accepted: 24.01.2024 Yayınlanma / Published: 15.04.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1359664

Özellikle altın, kurşun, çinko ve bakır gibi baz metalleri içeren hidrotermal yataklardan üretilen bu metallerin sürekli üretimini garanti altına almak için yeni yatakların keşfedilmesi, araştırılması ve ekonomiye kazandırılması gerekmektedir.

Epidotlaşma, karbonatlaşma, kloritleşme, serizitleşme, silisleşme ve killeşme hidrotermal sistemlerde en yoğun gözlenen hidrotermal alterasyon türlerindedir. Bu alterasyon türlerinin tanımlanması için petrografik incelemelere ve jeokimyasal analizlere gereksinim duyulur. Saha çalışmaları sırasında toplanan temsili hidrotermal alterasyon örnekleri, petrografik incelemeler için ince kesit hazırlama ve jeokimyasal analizler için ise toz numune hazırlama işlemlerine tabi tutulur. Petrografik incelemelerde yoğun alterasyona uğramış ve mineral tayini yapılamayan kayaç örneklerinde tanımlamalar, jeokimyasal analiz yöntemleri ile gerçekleştirilir. İnce kesitlerde hidrotermal alterasyon türlerinin belirlenebilmesi için uzun süreçlere ve hidrotermal alterasyon alanında uzman araştırmacılara ihtiyaç duyulur. Ancak son yıllarda, veri seti olarak ince kesit görüntüleri kullanılarak gerçekleştirilen bilgisayar uygulamaları kayaç türü belirleme ve/veya sınıflama da başarılı sonuçlar elde etmeye başlamıştır. Bu çalışmalara ait bazı örnekler aşağıda verilmiştir.

Polat vd. [7] altı farklı volkanik kayaca ait 1200 ince kesit görüntüsü bulunduran veri setini, oluşturdukları derin öğrenme ağını dört farklı optimizasyon fonksiyonu ile ayrı ayrı eğiterek volkanik kayaç sınıflandırması yapmışlardır. Araştırmacılar bu çalışmada, az altere/altere olmamış volkanik kayaçlara ait temsili ince kesit görüntülerinde çalışmayı gerçekleştirmişlerdir. Rubo vd. [8] beş farklı model oluşturarak sedimanter kayaçlara ait ince kesit görüntüleri üzerinde kalsit, dolomit, kuvars, kil, opak mineralleri ve ince kesitteki boşlukları sınıflandırmaya yönelik çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu modellerden ikisi yapay sinir ağları ile oluşturulmuşken diğer üçünde random forest algoritması kullanılmıştır. Lima ve Duarte [9], çamurtaşlarının petrografik sınıflandırmasında kullanılmak üzere, 5 farklı sondaj karotundan alınan örnekler için 98 ince kesitten mikroskop altında 2.5 ve 10 yakınlaştırma oranı kullanılarak 513 tane görüntü elde etmişlerdir. Bu görüntüleri dört sınıfa ayırarak evrişimli sinir ağı ile sınıflandırma yapmışlardır. Guojian ve Peisong [10], feldispat kumtaşlarının, tane boylarına göre sınıflandırmasını yapmak için, kayaçlardan elde ettikleri 10000 ince kesitin 8000 kadarını ağı eğitimi için, 2000 tanesini ağı testinde kullanarak ResNet50 ve ResNet101 transfer öğrenme modellerini eğitip %90.24 ve %91.63 doğruluklarla sınıflandırma elde etmişlerdir. Xu vd. [11], metamorfik, volkanik ve sedimanter (kırıntılı/karbonat) kayaç gruplarına ait 8882 ince kesit görüntüsünün %20'sini test için kullanmıştır. Bu görüntülerin bazıları ortogonal ışık altında diğerleri tek nikol ışık altında elde edilmiştir. Çalışmalarında ResNet-18 kullanarak bir sınıflandırma yapmışlardır. Zhang vd. [12] Petrografik ince kesit görüntü veri bankasından (Science Data Bank) elde ettikleri sedimanter ve metamorfik kayaçlardan oluşan 12 farklı kayaca ait ince kesit görüntülerinden 20242 görüntü oluşturmuşlardır. Kendi geliştirdikleri derin öğrenme ağı (PD-RSBU-CW)

sınıflandırma gerçekleştirmişlerdir. Iglesias vd. [13] demir cevherinin bileşim analizinde benzer yansımalarla sahip olan reçine ve kuvars fazının ayırt edilmesine yönelik 1747 reçine ve 1745 kuvars görüntüsünden veri setlerini oluşturup her sınıf için 442 görüntüyü test için kullanmışlardır. ESA ile yapılan sınıflandırmada %95'in üzerinde doğruluk elde etmişlerdir. Bérubé vd. [14] Kanada'nın Pontiac Bölgesi'nden 570 adet meta-sedimanter (160'ı altere olmuş), 122 adet mafik dayk (52'si altere olmuş), 113 adet felsik orta intrüzif (47'si altere olmuş) olmak üzere toplam 819 tane kayaç örneği toplamışlardır. Bu kayaçları tane yoğunlukları ve manyetik duyarlılıklarına göre sınıflandırmak için makine öğrenmesi yöntemleri olan; K-En Yakın Komşu (KNN), Destek Vektör Makineleri (SVM), Doğrusal Diskriminant Analizi (LDA), Rastgele Orman (RF) ve Naive Bayesian (NB) algoritmaları kullanılmıştır. SVM ve KNN algoritmaları diğer üç algoritmadan daha başarılı sınıflandırma yapmıştır. SVM algoritması meta-sedimanter için %73, mafik dayk için %93 ve felsik-orta intrüzif sınıfı için %69 f1 skoru üretmiştir.

Bu çalışmada, arazi çalışmaları kapsamında toplanan tamamen altere olmuş granitoyit ve volkanik kayaçlardan elde edilmiş olan ince kesit görüntüleri kullanılmıştır. Kayaç türleri belirlemede altere olmamış ve/veya az altere örneklerin tercih edilmesi gerekmektedir. Bu örneklerde, minerallerin yapısal ve dokusal özellikleri bozulmamış ve kompleks bir yapıda olmadıkları için tanımlamaları çıplak gözle bile kolaylıkla yapılabilmektedir. Nitekim yukarıda bahsedilen çalışmalarda (Bérubé vd. [14] hariç) genellikle kayaç türleri tespitine yönelik gerçekleştirilmiştir. Bérubé vd. [14] ise, altere olmamış kayaçlar ile altere olmuş kayaçları sınıflandırmaya yönelik bir çalışma gerçekleştirmiştir. İntrüzif ve volkanik kayaçların alterasyonu sonrasında benzer alterasyon mineralleri her iki kayaç sınıfında da gözlenebilir. Alterasyon yoğunluğu kayaç türü tespitini zorlaştırmakta bazı zamanlarda ise imkansız kılabilir. Bu nedenle, bu kayaçlara ait altere örnekler, altere olmamış örneklere göre farklı boyutlarda, kompleks ve grift yapıda mineralleri içerebilmektedir. Bunun sonucunda, her alterasyon türü de farklı görsel özellik (renk, yansıma, boyut vb.) gösterebilmektedir. Bu özellikleri nedeniyle bu çalışmada kullanılan altere örneklere ait ince kesit görüntüleri, yukarıda bahsedilen çalışmalarda kullanılan ince kesit görüntülerinden ayrılmaktadır. Ayrıca, çalışmada kullanılan ESA modeli, transfer öğrenme uygulamalarında kullanılan derin ağlar ile kıyaslandığında daha düşük donanımına sahip bilgisayarlarla ve daha kısa sürede eğitim işlemini sonuçlandırma kapasitesine sahip olabilmektedir. Bu nedenle, veri setinin nispeten küçük olduğu problemlerde hesaplama maliyetini azaltmak ve eğitim sürelerini kısaltmak için önerilen model kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında elde edilen 2500 adet ince kesit hidrotermal alterasyon görüntüsü kullanılarak 5 farklı alterasyon türünü ESA yardımıyla sınıflandırmaya çalışılmış, elde edilen sonuçlar aynı veri setinin Xception modeli ile eğitilmesi sonucu elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmıştır.

2 Materyal ve Metot

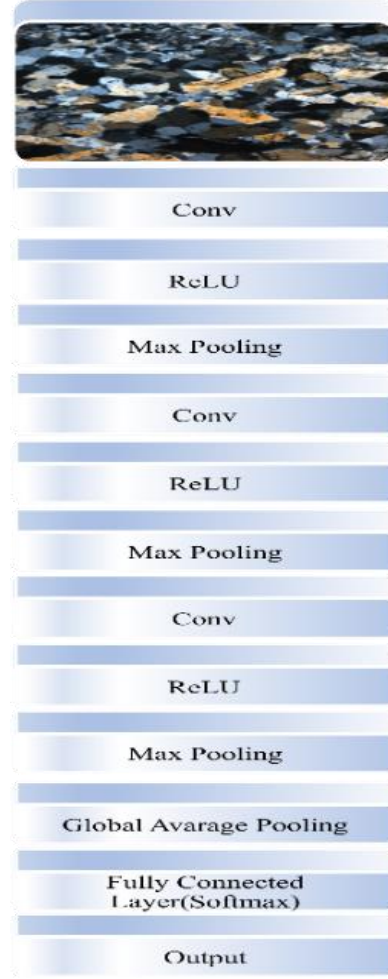
2.1. Derin öğrenme

Derin öğrenme, makine öğrenmesinin en çok tercih edilen alt dallarından bir tanesidir. Derin öğrenmeyi makine öğrenmesinin ötesine taşıyan durum, çok büyük veri setlerinin tanımlanması ve sınıflandırılmasında çok daha iyi sonuçlar üretebilmesidir [15]. Geleneksel makine öğrenimi yöntemleri kullanıcı tarafından birçok manuel ayarlama gerektirirken, derin öğrenmenin en büyük avantajlarından biri, sinir ağlarının daha önce görünür olmayan verilerden gizli öznelikleri ve ilişkileri ortaya çıkarabilme kabiliyetidir. Böylece kullanıcılara zaman ve enerji tasarrufu sağlayarak, büyük veri kümelerinde daha yüksek başarımlar elde edilmesine olanak tanır. Bu çalışmada, özellikle görüntü sınıflandırılması problemlerinde sıklıkla tercih edilen, ESA modeli oluşturularak, tanımlama ve sınıflandırma için kullanılmıştır.

2.2. Evrişimli sinir ağı

ESA'nın yapısı insan beyninden ilham alınarak tasarlanmıştır. Böylece ESA'nın işlem döngüsü, insan beyninin yapısını ve işlevini keşfederek kendi yapısını sürekli geliştirebilir [16]. ESA mimarisi çeşitli katmanların bir araya gelmesinden oluşmaktadır. Bölümlerde, konvolüsyon ve maksimum ortaklama katmanları vardır. Konvolüsyon katmanında nesnelerin özellik haritaları çıkarılarak, ağırlıkları hesaplanır ve bir dizine kaydedilir. Bu dizi aracılığıyla bir önceki katmanın özellik haritasındaki yerel parçalarla bağlanma gerçekleştirilir. Elde edilen yerel ağırlıkların toplamı düzeltilmiş doğrusal birim katmanından (ReLU) geçirilir. Maksimum ortaklama katmanı ise belirlenen boyuttaki filtreler ile özellik haritasındaki yerel parçaların maksimumunu alarak, bu değeri parçadaki değerlerin yerine geçecek şekilde bir atama yapar. Bu filtreler, filtre boyutunda kaydırılarak tüm özellik haritasında gezdirilir. Böylelikle ana şekil üzerinde çok bir bozulma ve değişim olmadan, boyut indirgeme yapılmış olur. Konvolüsyon katmanı takibinde ReLU fonksiyonu ve sonra da maksimum ortaklama katmanı kümesine, bir konvolüsyon bloğu (bölümü) denir. ESA, birçok konvolüsyon bölümünden ve sonunda tam bağlantı katmanından oluşmaktadır. Bu çalışmada oluşturulan ESA yapısı dört konvolüsyon bloğundan oluşmaktadır. İlk üç bölüm yukarıda bahsedildiği gibi konvolüsyon katmanı, ReLU katmanı ve maksimum ortaklama katmanından oluşmaktadır.

Giriş katmanında resimler boyut olarak küçültülerek 144x108 boyutlarına indirgenmiştir. Geliştirilen ESA modeli içerisinde, birinci ve ikinci konvolüsyon katmanlarında 3x3 boyutlarında 32 filtre, üçüncü katmanda aynı boyutlarda 64 filtre kullanılmıştır. Bu filtreler görüntü üzerinde, (1, 1) atlama miktarı ile çalıştırılmıştır. Maksimum ortaklama katmanında, 2x2 lik filtreler kullanılmıştır. Son katman, tam bağlantılı katman olup, sınıflandırmanın yapıldığı katmandır. Bu katmanda 128 filtre bulunup aktivasyon fonksiyonu olarak "softmax" kullanılmıştır. Oluşturulan derin öğrenme ağının yapısı Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu ağ, Adam, RMSprop, ve SGD optimizasyon fonksiyonları ile ayrı ayrı çalıştırılarak, sınıflandırma sonuçları elde edilmiştir.



Şekil 1. Evrişimli sinir ağı mimarisi

Optimizasyon fonksiyonlarının amacı, bir problemin çözümü için en uygun değişkenleri kullanarak, modelin en uygun sonuçları kullanmasını sağlamaktır. Bahsi geçen en uygun sonuç, bir işlem sonucu çıkan sonuçları maksimize ya da minimize edilmesini sağlayan fonksiyonlar ile bulunur. Bu işlemi yapan fonksiyonlara amaç fonksiyonları denir [17]. Bu sebeple optimizasyon fonksiyonları birçok mühendislik alanında kullanılmaktadır [18]. ESA'da optimizasyon fonksiyonlarının amacı kayıp fonksiyonun sonuçlarını minimize ederek modelin sınıflandırma işlemlerinde kullandığı ağırlıkları ve öğrenme oranları en uygun duruma getirmektir [19]. ESA'da ağırlıkların güncellenmesi için farklı optimizasyon fonksiyonları kullanılır ve bu güncellemeler geriye yayılım algoritması ile yapılır [20]. Kullanılan optimizasyon fonksiyonların çoğu SGD gibi stokastik amaç fonksiyonlarına sahiptir. SGD'de ağırlık hesaplamasında tüm gradyanları kullanmak yerine rastgele seçilenler üzerinden ağırlık hesaplaması yapılmaktadır. RMSprop eğitim sürecinde karşılaşılan sabit öğrenme katsayısı problemini çözmek için momentumlu gradyanların karesini almaktadır [21]. Adam optimizasyon fonksiyonu adı "Adaptif moment tahmini" anlamına gelmektedir. Adam, AdaGrad ve RMSprop optimizasyon fonksiyonlarının avantajlarını birleştirmek üzere

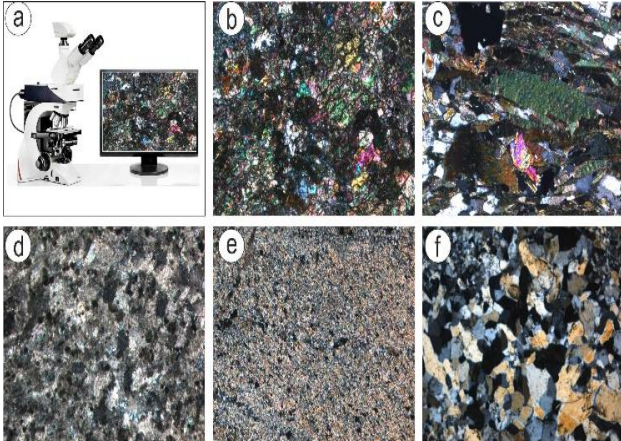
tasarlanmıştır. Adam birinci dereceden gradyanlar ile işlem gerektiren stokastik bir optimizasyon fonksiyonudur. Böylelikle uygulaması kolay, bellek gereksinimi az ve hesaplama için verimlidir [22].

Bu çalışmada, SGD optimizasyon fonksiyonu, öğrenme oranı (LR) 0,001 olarak seçilmiştir. Adam optimizasyon fonksiyonu için, öğrenme oranı 0,0001 olarak belirlenmiştir. RMSprop optimizasyon fonksiyonu ise 2×10^{-5} öğrenme oranı çalıştırılmıştır. Her bir eğitimin, simülasyon sonuçları kaydedilerek, sonuç bölümünde karşılaştırması yapılmıştır.

Kullanılan derin öğrenme modelleri, python programlama dili ile, tensorflow ve keras kütüphaneleri kullanılarak oluşturulmuştur. Bu model, Intel Core i7 10700KF işlemci, NVIDIA GeForce RTX 3060 16GB model ekran kartı ve 64GB ram kapasitesine sahip Windows işletim sistemli bir bilgisayarda eğitilmiştir.

2.3. Veri seti

Bu çalışmada petrografik olarak tanımlanan alterasyon tiplerinin ince kesitleri Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Laboratuvarında hazırlanmış ve incelenmiştir. Alterasyon tiplerinin fotomikrografları için Leica DM 2500 polarize mikroskop kullanılmıştır. Her bir değişiklik türü için 1728x1296 piksel boyutunda 500'er adet olmak üzere toplam 2500 mikrogram elde edilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Kullanılan mikroskop sistemi ve alterasyon türlerine ait temsili ince kesit görüntüleri (a) Leica Dm-2500p polarize mikroskop, (b) epidotlaşma, (c) kloritleşme, (d) karbonatlaşma, (e) serizitleşme, (f) silisleşme

Oluşturulan veri setinin %70'i ağız eğitilmesinde, %20'si ağız test edilmesinde ve kalanı da ağız geçerliliğinin kontrol edilmesinde kullanılmıştır. Ağız eğitilmesi sırasında işlem hacminin azalması için girdilerin boyutları 144x108 piksel boyutlarına indirgenmiştir.

2.4. Karışıklık matrisi

Sınıflandırma yapılan modellerin, başarısını etkili bir şekilde değerlendirmek için karışıklık matrisinden faydalanılmaktadır [23]. Karışıklık matrisi satır ve sütunlardan oluşmaktadır. Satırlar tahmin sınıflarını ifade ederken, sütunlar gerçek sınıflarını göstermektedir. Örnek bir karışıklık matrisi yapısı Tablo 1'de gösterilmiştir. Bu

tabloda doğru şekilde sınıflandırılan pozitif ve negatif değerler sırasıyla TP ve TN ile gösterilirken, yanlış bir şekilde sınıflandırılan pozitif ve negatif değerler sırasıyla FP ve FN ile gösterilmiştir. Karışıklık matrisindeki veriler, sınıflandırmanın başarısının ölçülmesinde, etkili sonuçlar vermektedir [24].

Tablo 1. Karışıklık matrisi yapısı

	Tahmin Edilen Pozitif Değer(+)	Tahmin Edilen Negatif Değer(-)
Gerçek Pozitif Değer(+)	TP	FN
Gerçek Negatif Değer(-)	FP	TN

2.5. Performans karşılaştırma ölçütleri

Tüm optimizasyon fonksiyonları ile çalıştırılan ESA'nın sınıflandırma başarısı, karışıklık matrisi (confusion matrix), doğruluk (accuracy), kesinlik skoru (precision-p), duyarlılık skoru (recall-r) ve f1-skor metriklerine göre değerlendirilmiştir. Bu metriklerin kullandığı bağıntılar sırasıyla aşağıdaki, Denklem (1, 2, 3, 4)'de verilmiştir [24].

$$\text{Doğruluk(Accuracy)} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (1)$$

$$\text{Kesinlik(Precision - p)} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

$$\text{Duyarlılık Skoru(Recall - r)} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

$$f1 - \text{skor} = 2 \times \frac{p \times r}{p + r} \quad (4)$$

3 Bulgular ve tartışma

Hazırlanan veri seti üzerinde hidrotermal alterasyon tiplerin tespiti ve sınıflandırılması için bu çalışmada iki farklı derin öğrenme modeli kullanılmıştır. Bu çalışmada önerilen ESA modeli ve literatürde yaygın olarak kullanılan Xception modeli [25] ile oluşturulan ağlar veri seti üzerinde eğitilerek kullanılmıştır. Her iki modelde de tüm optimizasyon fonksiyonları için yığın boyutu (batch-size) 25, bölüm değeri (epoch) 50 olarak belirlenmiştir.

3.1 ESA modeli simülasyon sonuçları

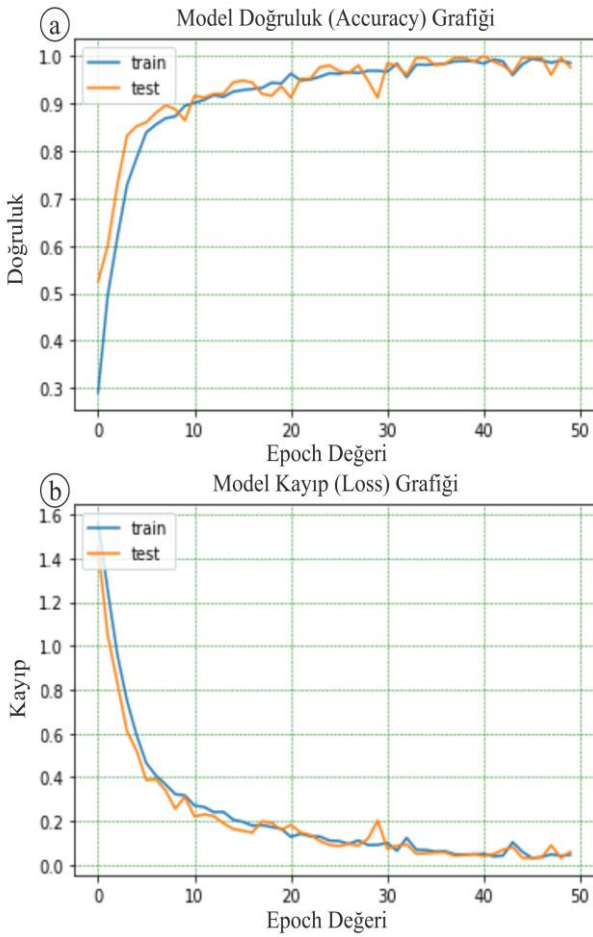
Belirlenen parametreler ile eğitilmiş ESA'lara ait sonuçlar bu bölüm içerisinde değerlendirilmiştir. Adam, RMSprop ve SGD optimizasyon fonksiyonları kullanılarak eğitilen ESA'lar, sırasıyla 128.86 sn, 133.13 sn ve 132.78 sn sürede eğitim algoritmasını başarıyla tamamlamışlardır.

Üç farklı optimizasyon fonksiyonu ile eğitilen ESA modeli için elde edilen sonuçlara ait Doğruluk ve Kayıp Grafikleri, ayrıca eğitim sonunda gerçekleşen sınıflandırma sonuçlarının analizi için Karışıklık Matrisleri ait bulgular sunulmuştur.

Doğruluk ve Kayıp Grafikleri üzerinde eğitim (train) veri setine ait eğitim sonuçları mavi renk ile, test veri setine ait sonuçlar ise turuncu renk ile gösterilmiştir. Karışıklık matrisi içerisinde doğru şekilde sınıflandırılan test veri setine ait resimler matrisin köşegeni boyunca koyu mavi kutucuk içerisinde gösterilmiştir.

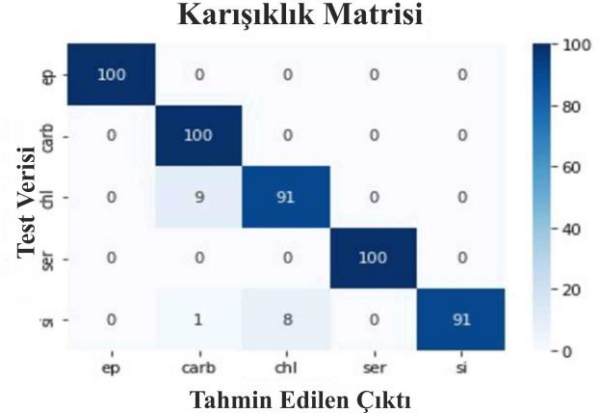
3.1.1 ESA-Adam

ESA'nın Adam optimizasyon fonksiyonu ile eğitilmesi sonucu elde edilen Model Doğruluk (Accuracy) ve Model Kayıp (Loss) Grafikleri Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Adam optimizasyon fonksiyonu ile eğitilen ağın (a) Model Doğruluk (Accuracy) ve (b) Model Kayıp (Loss) Grafikleri

Bu grafiklerde, 10. epoch değerine kadar hızlı bir öğrenme ve sonrasında 0.9 doğruluk değerinin üzerine çıkıldığında ise nispeten daha yavaş bir öğrenme gerçekleştiği eğitim sonucunda ise 0.96'lık bir doğruluk değerine erişildiği görülmektedir.



Şekil 4. Adam optimizasyon fonksiyonuna ait karışıklık matrisi

Ağın Adam optimizasyon fonksiyonu ile çalıştırılması sonucu elde edilen karışıklık matrisine göre (Şekil 4); epidotlaşma, karbonatlaşma ve serizitleşme sınıfları tamamen doğru sınıflandırılmış, kloritleşme sınıfının 9 tanesi karbonatlaşma sınıfına atanmış, silisleşme sınıfının 8 tanesi kloritleşme sınıfına atanırken, 1 tanesi karbonatlaşma sınıfına atanmıştır. Toplamda 500 tane test verisinin 482 tanesi doğru sınıfa atanırken 18 tanesi farklı sınıflara atanmıştır.

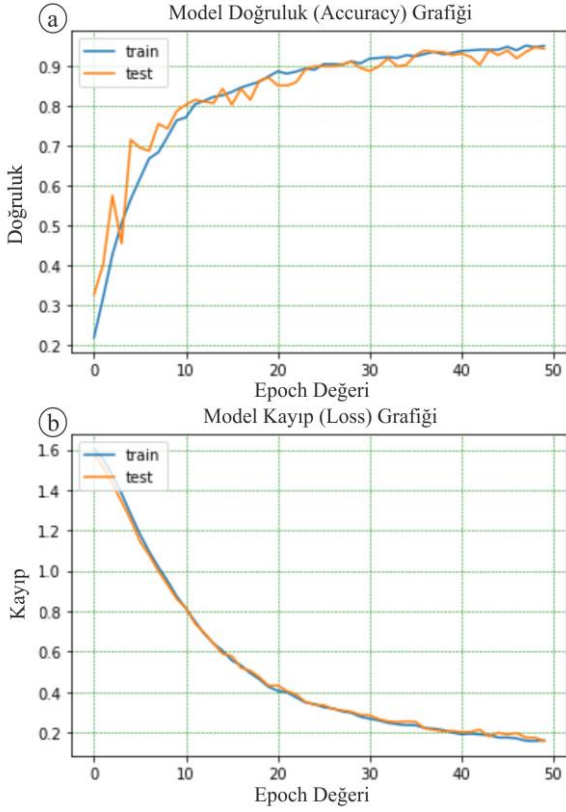
ESA'nın Adam optimizasyon fonksiyonu ile eğitilmesi sonucunda elde edilen sonuçlar Tablo 2' de gösterilmiştir.

Tablo 2. Adam optimizasyon fonksiyonuna ait sonuçlar

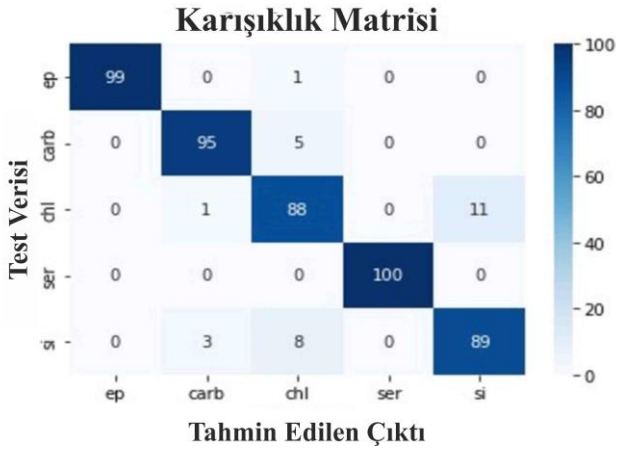
	precision	recall	f1-score	support
epidotlaşma	1.00	1.00	1.00	100
karbonatlaşma	0.91	1.00	0.95	100
kloritlesme	0.92	0.91	0.91	100
serizit	1.00	1.00	1.00	100
silislesme	1.00	0.91	0.95	100
Doğruluk (accu.)			0.96	500
Makro ort.	0.97	0.96	0.96	500
Ağırlıklı ort.	0.97	0.96	0.96	500

3.1.2 ESA-RMSprop

ESA'nın RMSprop optimizasyon fonksiyonu ile eğitilmesine ait Model Doğruluk (Accuracy) ve Model Kayıp (Loss) Grafikleri Şekil 5'te gösterilmiştir. RMSprop optimizasyon fonksiyonu ile eğitilen ağın eğitim sonunda 0.94'lük bir doğruluk değerine ulaşabilmiştir.



Şekil 5. RMSprop optimizasyon fonksiyonu ile eğitilen ağı (a) Model Doğruluk (Accuracy) ve (b) Model Kayıp (Loss) grafikleri



Şekil 6. RMSprop optimizasyon fonksiyonuna ait karışıklık matrisi

Ağın RMSprop optimizasyon fonksiyonu ile eğitilmesi sonucunda elde edilen karışıklık matrisine göre (Şekil 6); serizitleşme sınıfına ait fotoğraflar tamamen doğru sınıflandırılmıştır.

Epidotlaşma sınıfına ait görüntülerden 1 tanesi kloritleşme sınıfına atanmış, karbonatlaşma sınıfının 5 tanesi kloritleşme sınıfına atanmış, kloritleşme sınıfının 11 tanesi silisleşme sınıfına atanırken 1 tanesi karbonatlaşma sınıfına atanmıştır, silisleşme sınıfının 8 tanesi kloritleşme sınıfına atanırken, 3 tanesi karbonatlaşma sınıfına atanmıştır.

Toplamda 500 tane test verisinin 471 tanesi doğru sınıfa atanırken, 29 tanesi yanlış sınıflandırılmıştır.

ESA'nın RMSprop optimizasyon fonksiyonu ile eğitilmesi sonucunda elde edilen sonuçlar Tablo 3'te gösterilmiştir.

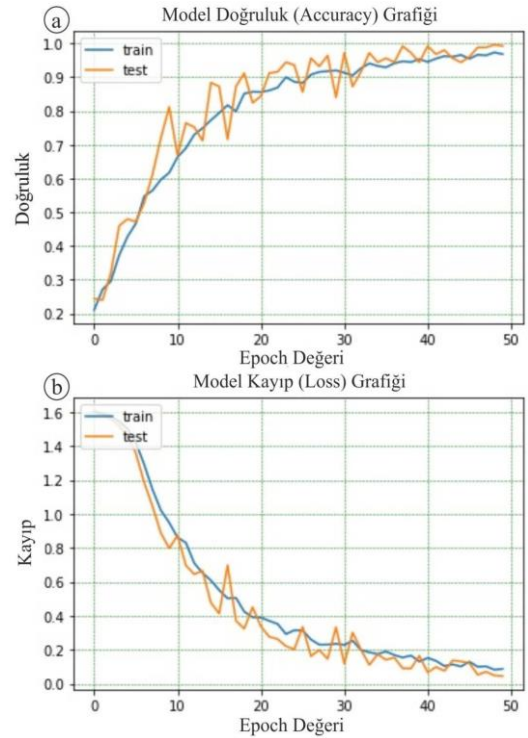
Yapılan çalışma neticesinde en düşük doğruluk ve f1-skor değerleri sırasıyla 0.94 doğruluk ve 0.87 f1-skor ile RMSprop optimizasyon fonksiyonu ile eğitilen ESA modelinde gerçekleşmiştir.

Tablo 3. RMSprop optimizasyon fonksiyonuna ait sonuçlar

	precision	recall	f1-score	support
epidotlaşma	1.00	0.99	0.99	100
karbonatlaşma	0.96	0.95	0.95	100
kloritleşme	0.86	0.88	0.87	100
serizit	1.00	1.00	1.00	100
silisleşme	0.89	0.89	0.89	100
Doğruluk (accu.)			0.94	500
Makro ort.	0.94	0.94	0.94	500
Ağırlıklı ort.	0.94	0.94	0.94	500

3.1.3 ESA-SGD

ESA modelinin, SGD optimizasyon fonksiyonu ile eğitilmesine ait Model Doğruluk (Accuracy) ve Model Kayıp (Loss) Grafikleri Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. SGD optimizasyon fonksiyonu ile eğitilen ağı (a) Model Doğruluk (Accuracy) ve (b) Model Kayıp (Loss) grafikleri

SGD optimizasyon fonksiyonu ile eğitilen ağın ilk 15 epoch değeri için hızlı bir şekilde öğrendiği 0.85 doğruluk değerinin üzerine çıkılmaya başladığında ise ağın öğrenmesin nispeten yavaşladığı gözlemlenmiştir. Adam optimizasyon fonksiyonuna kıyasla SGD' nin öğrenme performansının bu problem için daha düşük olduğu ifade edilebilir.

Bu grafiklerden yüksek doğrulukla bir öğrenme gerçekleştiği görülmekle birlikte, Adam optimizasyon fonksiyona göre daha yavaş bir öğrenme gerçekleştiği söylenebilir.



Şekil 8. SGD optimizasyon fonksiyonuna ait karışıklık matrisi

Ağın SGD optimizasyon fonksiyonu ile çalıştırılması ile elde edilen karışıklık matrisine göre (Şekil 8); epidotlaşma, karbonatlaşma, serizitleşme ve silisleşme sınıfları tamamen doğru sınıflandırılmıştır.

Kloritleşme sınıfının 2 tanesi karbonatlaşma, 1 tanesi epidotlaşma ve 16 tanesi silisleşme sınıfına atanmıştır. Toplamda 481 tane veri doğru şekilde sınıflandırılırken 19 tanesi ise yanlış sınıflara atanmıştır.

ESA modelinin, SGD optimizasyon fonksiyonu ile eğitilmesi sonucunda elde edilen sonuçlar Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. SGD optimizasyon fonksiyonuna ait sonuçlar

	precision	recall	f1-score	support
epidotlaşma	0.99	1.00	1.00	100
karbonatlaşma	0.98	1.00	0.99	100
kloritleşme	1.00	0.81	0.90	100
serizit	1.00	1.00	1.00	100
silisleşme	0.86	1.00	0.93	100
Doğruluk (accu.)			0.96	500
Makro ort.	0.97	0.96	0.96	500
Ağırlıklı ort.	0.97	0.96	0.96	500

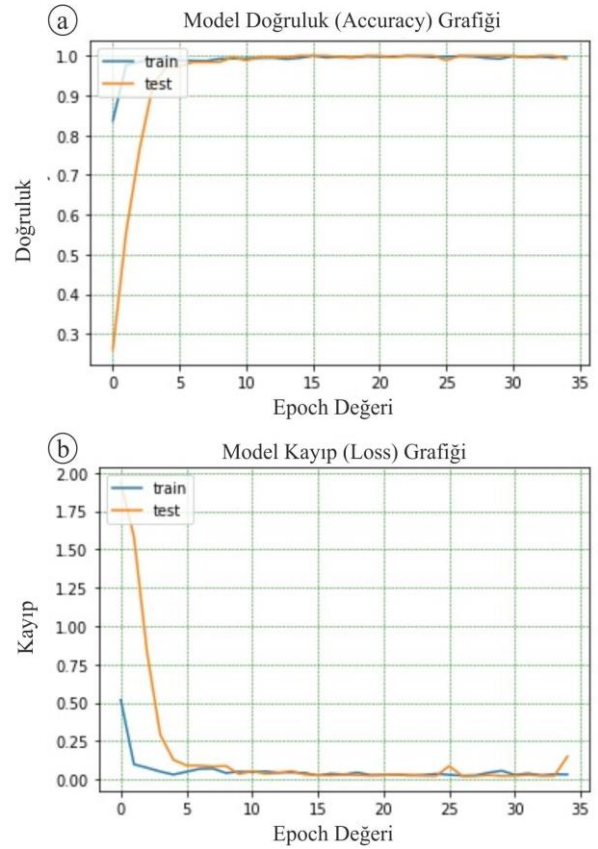
3.2 Xception ağı simülasyon sonuçları

Bu çalışma kapsamında hidrotermal alterasyon tiplerinin tespiti ve sınıflandırılması için kullanılan bir diğer derin öğrenme modeli olan Xception modeli tüm optimizasyon fonksiyonları için eğitilmiştir [25]. ESA için kullanılan yığın boyutu (batch-size) ve bölüm (epoch) değerleri sonuçların her iki model ile karşılaştırılabilmesi için aynı tutulmuştur. Xception modeline ait derin ağı Adam, RMSprop ve SGD optimizasyon fonksiyonları kullanılarak eğitilmesi sonucunda, sırasıyla 336.88 sn, 371.24 sn ve 458.93 sn sürede eğitim algoritması başarıyla tamamlamışlardır. Bu süreler bir önceki ESA modeli ile karşılaştırıldığında Xception modelinin eğitim süresinin 2.61 ile 3.45 kat daha uzun olduğu gözlemlenmiştir.

Xception modelinin üç farklı optimizasyon fonksiyonu kullanılarak eğitilmesi sonucunda elde edilen Doğruluk, Kayıp Grafikleri ve Karışıklık Matrisleri alt başlıklar içerisinde sunulmuştur.

3.2.1 Xception-Adam

Günümüzde yaygın olarak kullanılan derin öğrenme ağlarından biri olan Xception modeli ile kurulu ağı, Adam optimizasyon fonksiyonu ile eğitilmesine ait Model Doğruluk (Accuracy) ve Model Kayıp (Loss) Grafikleri Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Xception modelinin Adam optimizasyon fonksiyonu ile eğitilmesi sonucu elde edilen (a) Model Doğruluk (Accuracy) ve (b) Model Kayıp (Loss) grafikleri

Bu grafikler incelendiğinde yüksek doğrulukla bir öğrenme gerçekleştiği ağırlıklı ve doğru bir şekilde öğrenimi tamamladığı ve doğruluk olarak 0.98 değerine ulaştığı görülmektedir. ESA modelinde olduğu gibi Adam optimizasyon fonksiyonunun öğrenme başarısı oldukça yüksektir.

Ağın Adam optimizasyon fonksiyonu ile çalıştırılması sonucu elde edilen karışıklık matrisine göre (Şekil 10); epidotlaşma, karbonatlaşma ve silisleşme sınıfları tamamen doğru sınıflandırılmış, kloritleşme sınıfının 3 tanesi karbonatlaşma sınıfına atanmıştır.

Serizitleşme sınıfın 6 tanesi ise epidotlaşma sınıfına atanmıştır. Toplamda 500 tane test verisinin 491 tanesi doğru sınıfa atanırken 9 tanesi farklı sınıflara atanmıştır.



Şekil 10. Adam optimizasyon fonksiyonu ile eğitilen Xception modeline ait Karışıklık Matrisi

Xception modelinin Adam optimizasyon fonksiyonu ile eğitilmesi sonucunda elde edilen sonuçlar Tablo 5’ te gösterilmiştir.

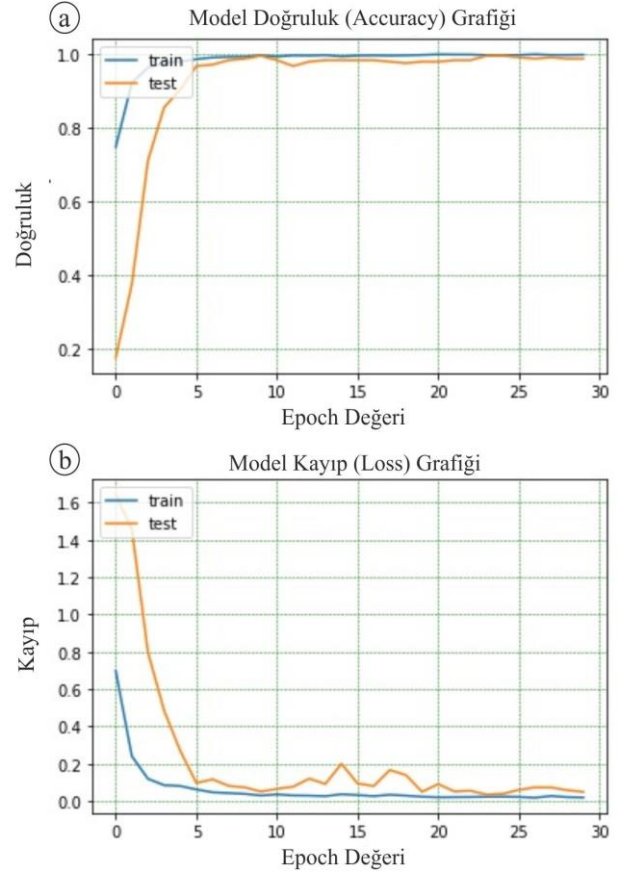
Tablo 5. Adam optimizasyon fonksiyonuna ait sonuçlar

	precision	recall	f1-score	support
epidotlaşma	0.94	1.00	0.97	100
karbonatlaşma	0.97	1.00	0.99	100
kloritlesme	1.00	0.97	0.98	100
serizit	1.00	0.94	0.97	100
silislesme	1.00	1.00	1.00	100
Doğruluk (accu.)			0.98	500
Makro ort.	0.98	0.98	0.98	500
Ağırlıklı ort.	0.98	0.98	0.98	500

Adam optimizasyon fonksiyonu ile eğitilen modelin doğruluğu 0.98 olarak hesaplanmıştır. Bu değer ESA modeli ile karşılaştırıldığında 0.2 puan daha yüksek olsa da her iki model için hesaplama süresi kıyaslandığında ESA modelinin Xception’a göre 2.61 kat daha hızlı bir şekilde eğitimi tamamladığı görülmektedir.

3.2.2 Xception- RMSprop

Xception modeli ile oluşturulan ağın, RMSprop optimizasyon fonksiyonu ile eğitilmesine ait Model Doğruluk (Accuracy) ve Model Kayıp (Loss) Grafikleri Şekil 11’de gösterilmiştir.



Şekil 11. Xception modelinin RMSprop optimizasyon fonksiyonu ile eğitilmesi sonucu elde edilen (a) Model Doğruluk (Accuracy) ve (b) Model Kayıp (Loss) grafikleri

Bu grafikler incelendiğinde modelin yüksek doğrulukla bir öğrenme gerçekleştiği ve doğruluk olarak 0.98 değerine ulaştığı görülmektedir. Xception modelinde ESA modelinden farklı olarak RMSprop optimizasyon fonksiyonunun öğrenme hızı ve ulaştığı doğruluk değeri daha yüksektir.

Xception modelinin RMSprop optimizasyon fonksiyonu ile çalıştırılması sonucu elde edilen karışıklık matrisine göre (Şekil 12); epidotlaşma ve karbonatlaşma sınıfları tamamen doğru sınıflandırılmış, kloritleşme sınıfının 2 tanesi epidotlaşma, 1 tanesi ise silisleşme sınıfına atanmıştır.

Serizitleşme sınıfın 3 tanesi kloritleşme 1 tanesi ise silisleşme sınıfına atanmıştır. Silisleşme sınıfı incelendiğinde sadece 1 tanesinin epidotlaşma olarak hatalı sınıflandırıldığı görülebilir.

Toplamda 500 tane test verisinin 492 tanesi doğru sınıfa atanırken 8 tanesi farklı sınıflara atanmıştır.



Şekil 12. RMSprop optimizasyon fonksiyonu ile eğitilen Xception modeline ait karışıklık matrisi

Xception modelinin RMSprop optimizasyon fonksiyonu ile eğitilmesi sonucunda elde edilen sonuçlar Tablo 6' da gösterilmiştir.

Tablo 6. RMSprop optimizasyon fonksiyonuna ait sonuçlar

	precision	recall	f1-score	support
epidotlaşma	0.97	1.00	0.99	100
karbonatlaşma	1.00	1.00	1.00	100
kloritlesme	0.97	0.97	0.97	100
serizit	1.00	0.96	0.98	100
silislesme	0.98	0.99	0.99	100
Doğruluk (accu.)			0.98	500
Makro ort.	0.98	0.98	0.98	500
Ağırlıklı ort.	0.98	0.98	0.98	500

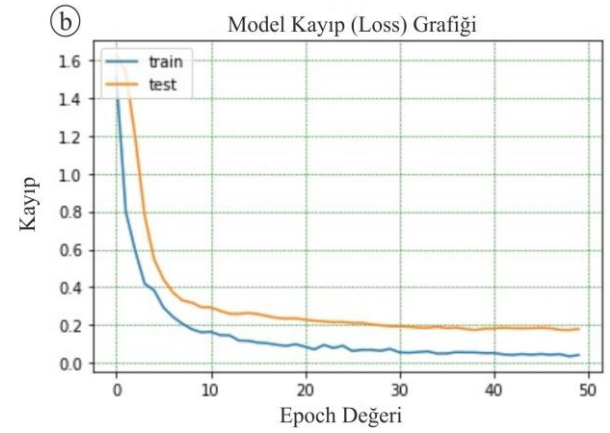
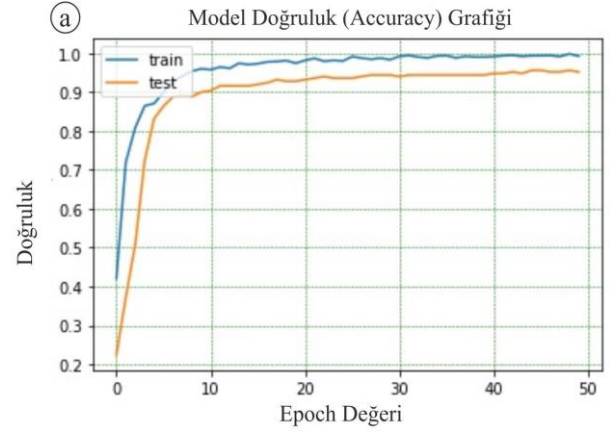
RMSprop optimizasyon fonksiyonu ile eğitilen modelin doğruluğu 0.98 olarak hesaplanmıştır. Xception modelinin Adam fonksiyonu ile hesaplanan değerlere çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Ağın eğitim süresi ESA modeline göre oldukça uzun sürede yaklaşık 2.79 kat daha tamamlanmıştır.

3.2.3 Xception-SGD

Xception modeli ile oluşturulan ağın, SGD optimizasyon fonksiyonu ile eğitilmesine ait Model Doğruluk (Accuracy) ve Model Kayıp (Loss) Grafikleri Şekil 13'te gösterilmiştir.

Bu grafikler incelendiğinde ağın öğreniminin Adam ve RMSprop fonksiyonları ile eğitilen ağlara göre daha yavaş gerçekleştiği test verisinin ancak onuncu epoch değerinden sonra 0.9 doğruluk değerine ulaştığı görülmektedir. Ağın eğitimi tamamlandığında, modelin elde ettiği en yüksek doğruluk değerinin 0.96 olduğu görülmüştür.

SGD optimizasyon fonksiyonu ile eğitilen ESA modeli ile karşılaştırıldığında 0.2 puan daha iyi bir öğrenme değeri elde ettiği hesaplanabilir.



Şekil 13. Xception modelinin SGD optimizasyon fonksiyonu ile eğitilmesi sonucu elde edilen (a) Model Doğruluk (Accuracy) ve (b) Model Kayıp (Loss) grafikleri

Bu grafikler incelendiğinde ağın öğreniminin Adam ve RMSprop fonksiyonları ile eğitilen ağlara göre daha yavaş gerçekleştiği test verisinin ancak onuncu epoch değerinden sonra 0.9 doğruluk değerine ulaştığı görülmektedir. Ağın eğitimi tamamlandığında, modelin elde ettiği en yüksek doğruluk değerinin 0.96 olduğu görülmüştür.

SGD optimizasyon fonksiyonu ile eğitilen ESA modeli ile karşılaştırıldığında 0.2 puan daha iyi bir öğrenme değeri elde ettiği hesaplanabilir.

Xception modelinin SGD optimizasyon fonksiyonu ile çalıştırılması sonucu elde edilen karışıklık matrisine göre (Şekil 14); serizitleşme sınıfı tamamen doğru sınıflandırılmıştır.

Epidotlaşma sınıfının 1 tanesi kloritlesme, 1 tanesi ise silislesme sınıfına atanmıştır. Karbonatlaşma sınıfının 1 tanesi silislesme sınıfına atanmıştır.

Kloritlesme sınıfın 4 tanesi epidotlaşma 1 tanesi ise karbonatlaşma sınıfına atanmıştır. Silislesme sınıfı incelendiğinde 2 tanesinin karbonatlaşma, 2'sinin ise kloritlesme olarak hatalı sınıflandırıldığı görülebilir.

Toplamda 500 tane test verisinin 482 tanesi doğru sınıfa atanırken 18 tanesi ise farklı sınıflara atanmıştır.



Şekil 14. SGD optimizasyon fonksiyonu ile eğitilen Xception modeline ait karışıklık matrisi

Xception modelinin SGD optimizasyon fonksiyonu ile eğitilmesi sonucunda elde edilen sonuçlar Tablo 7’de gösterilmiştir.

Tablo 7. SGD optimizasyon fonksiyonuna ait sonuçlar

	precision	recall	f1-score	support
epidotlasma	0.96	0.98	0.97	100
karbonatlasma	0.97	0.99	0.98	100
kloritleşme	0.97	0.89	0.93	100
serizit	1.00	1.00	1.00	100
silisleşme	0.92	0.96	0.94	100
Doğruluk (accu.)			0.96	500
Makro ort.	0.96	0.96	0.96	500
Ağırlıklı ort.	0.96	0.96	0.96	500

SGD optimizasyon fonksiyonu ile eğitilen modelin doğruluğu 0.96 olarak hesaplanmıştır. Ağın eğitim süresi ESA modeline ile kıyaslandığında yaklaşık 3.45 kat daha uzun sürede tamamlanmıştır.

3.3 ESA ve Xception modellerinin karşılaştırılması

Bu çalışma içerisinde oluşturulan veri seti ile üç farklı optimizasyon fonksiyonu kullanılarak eğitilen ESA ve Xception derin öğrenme modellerine ilişkin simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 8 içerisinde verilmiştir.

Tablo 8 incelendiğinde, en yüksek başarımların 0.98 değeri ile Xception-Adam ve Xception-RMSprop modellerinin elde ettiği görülmektedir.

Doğru ve yanlış sınıflandırma değerleri referans alındığında Xception-RMSprop modelinin 492 doğru 8 yanlış sınıf eşleştirmesi ile en yüksek orana sahip olduğu Xception-Adam modelinin 491 doğru 9 yanlış sınıf eşleştirmesi ile ikinci sırada yer aldığı görülebilir.

Kayıp (loss) değerleri kıyaslandığında en düşük 0.05 değeri ile Xception-RMSprop modelinin olduğu görülmekte, ikinci sırada ise 0.099 ile ESA-Adam modeli gelmektedir.

Modellere ait eğitim süreleri incelendiğinde ESA modellerinin Xception modellerine göre çok daha hızlı şekilde eğitimi tamamladıkları görülmektedir. ESA-Adam modeli ile Xception-RMSprop modelleri kıyaslandığında ESA-Adam modelinin 2.88 kat daha hızlı işlemi tamladığı hesaplanabilir.

Tablo 8. ESA ve Xception modellerinin kıyaslanması

	Metrik	ESA	Xception
Adam	Doğruluk(acc.)	0.96	0.98
	Kayıp (loss)	0.099	0.14
	Zaman (sn)	128.86	336.88
	Hatalı Sınıf	482	491
	Doğru Sınıf	18	9
RMSprop	Doğruluk(acc.)	0.94	0.98
	Kayıp (loss)	0.17	0.05
	Zaman (sn)	133.13	371.24
	Hatalı Sınıf	471	492
	Doğru Sınıf	29	8
SGD	Doğruluk(acc.)	0.96	0.96
	Kayıp (loss)	0.09	0.18
	Zaman (sn)	132.78	458.93
	Hatalı Sınıf	481	482
	Doğru Sınıf	19	18

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, değerli metalik maden yataklarının belirlenmesinde önemli bir rolü olan hidrotermal alterasyon türlerinden olan “epidotlaşma, karbonatlaşma, kloritleşme, serizitleşme, silisleşme” türlerine ait ince kesit görüntülerini barındıran veri seti, Evrişimli Sınır Ağları ile kurulan iki farklı derin öğrenme modeliyle eğitilip test edilmiştir. Bu çalışmada anlatılan ESA modeli en iyi sınıflandırma sonucunu Adam ve SGD optimizasyon fonksiyonu için “0.96” doğruluk oranı ile elde etmiştir. RMSprop optimizasyon fonksiyonu için bu değer 0.94 olarak bulunmuştur. Algoritmaların elde ettikleri en düşük f1 skorları incelendiğinde elde edilen doğruluk, f1 skor ve karışıklık matrisi sonuçları neticesinde, uzmanlar tarafından uzun süreli ve zahmetli süreçlerle belirlenen hidrotermal alterasyon tiplerinin, derin öğrenme ağları kullanılarak %96’ya varan bir doğruluk oranı ile ve bu çalışma kapsamında eğitilen Xception modeline kıyasla oldukça kısa bir sürede tahmin edilebileceğini göstermektedir.

Xception modeli ile eğitilen derin öğrenme ağı ESA modeline kıyasla tüm optimizasyon fonksiyonlarında daha yüksek doğruluk değerine ulaşmıştır. Xception ve ESA modelleri arasındaki doğruluk farkı %2 ile %4’lük bir değer aralığında değişmektedir. Her iki model eğitim süresi olarak kıyaslandığında ise ESA modeli 3.45 kata kadar daha hızlı şekilde ağı eğitimi tamamlamayı başarmıştır.

Bu çalışmada elde edilen veriler, hidrotermal alterasyon tipleri için görüntü tanımlama ve sınıflandırmada derin öğrenmenin başarısını göstermektedir. Bununla birlikte ilerleyen çalışmalarda daha başarılı sınıflandırmalar yapabilmek için veri setinin genişletilerek iki katına

çıkartılması ve VGG, ResNet, GoogLeNet gibi çok daha derin ağların ImageNet gibi büyük bir veri seti ile ön eğitimden geçirildikten sonra transfer öğrenme yöntemi ile eğitilerek kullanılması planlanmaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %19

Kaynaklar

- [1] D. G. Tang, K. L. Milliken, ve K. T. Spikes, Machine learning for point counting and segmentation of arenite in thin section, *Mar Pet Geol*, 120, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104518>.
- [2] M. A. Abdelkader, Y. Watanabe, A. Shebl, H. A. El-Dokouny, M. Dawoud, and Á. Csámer, Effective delineation of rare metal-bearing granites from remote sensing data using machine learning methods: A case study from the Umm Naggat Area, Central Eastern Desert, Egypt, *Ore Geol Rev*, 150, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105184>.
- [3] U. Zidan, H. A. El Desouky, M. M. Gaber, and M. M. Abdelsamea, From pixels to deposits: porphyry mineralization with multispectral convolutional neural networks, *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens*, 16, 9474-9486, 2023. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2023.3321714>
- [4] S. Metlek and H. Cetiner, ResUNet+: A new convolutional and attention block-based approach for brain tumor segmentation, *IEEE Access*, 11, 69884–69902, 2023. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3294179>.
- [5] H. Çetiner and S. Metlek, DenseUNet+: A novel hybrid segmentation approach based on multi-modality images for brain tumor segmentation, *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 35(8), 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2023.101663>.
- [6] F. Pirajno, Hydrothermal Processes and Wall Rock Alteration. 73-164, 2009.
- [7] Ö. Polat, A. Polat, and T. Ekici, Automatic classification of volcanic rocks from thin section images using transfer learning networks, *Neural Comput Appl*, 33(18), 11531–11540, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-05849-3>.
- [8] R. A. Rubo, C. de Carvalho Carneiro, M. F. Michelon, ve R. dos S. Gioria, Digital petrography: Mineralogy and porosity identification using machine learning algorithms in petrographic thin section images, *J Pet Sci Eng*, 183, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106382>.
- [9] R. P. de Lima ve D. Duarte, Pretraining convolutional neural networks for mudstone petrographic thin-section image classification, *Geosciences (Switzerland)*, 11(8), 2021. <https://doi.org/10.3390/GEOSCIENCES11080336>.
- [10] C. Guojian ve L. Peisong, Rock thin-section image classification based on residual neural network, in 2021 IEEE 6th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing, ICSP 2021, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 521–524, 2021. <https://doi.org/10.1109/ICSP51882.2021.9408983>.
- [11] Y. Xu, Z. Dai, ve Y. Luo, Research on application of image enhancement technology in automatic recognition of rock thin section, in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing Ltd, 2020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/605/1/012024>.
- [12] X. L. Zhang, Z. J. Wang, D. T. Liu, Q. Sun, and J. Wang, Rock thin section image classification based on depth residuals shrinkage network and attention mechanism, *Earth Sci Inform*, 16(2), 1449–1457, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12145-023-00981-1>.
- [13] J. C. Á. Iglesias, R. B. M. Santos, and S. Paciornik, Deep learning discrimination of quartz and resin in optical microscopy images of minerals, *Miner Eng*, 138, 79–85, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.04.032>.
- [14] C. L. Bérubé, R. Gema, B. Olivo, C. Chouteau, P. Perrouy, S. Pejman, J. J. Enkin, M.A. William, F. Leonardo, T. Raphaël, Predicting rock type and detecting hydrothermal alteration using machine learning and petrophysical properties of the Canadian Malartic ore and host rocks, Pontiac Subprovince, Québec, Canada, *Ore Geol Rev*, 96, 130–145, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.04.011>.
- [15] V. Kůrková, Y. Manolopoulos, B. Hammer, L. Iliadis, ve I. Maglogiannis, Eds., Artificial Neural Networks and Machine Learning – ICANN 2018, 11141, Cham: Springer International Publishing, 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-01424-7>.
- [16] Artificial Neural Networks and Machine Learning-ICANN 2018. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/7407>
- [17] S. Kızılok, Fizik Tabanlı Yeni Hibrit Optimizasyon Algoritmalarının Geliştirilmesi ve Veri Madenciliğinde Uygulamaları. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2017.
- [18] M. Beşkirli ve M. F. Tefek, Gradyan Tabanlı Optimize Edici Algoritmasının Parametre Ayarlaması, *European Journal of Science and Technology*, 2021. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1010813>.
- [19] M. R. Öner, Derin öğrenme algoritmaları kullanılarak dış ve orta kulak hastalıklarının tespit edilmesi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 2023.
- [20] Ö. İnik, E. Ülker, Derin öğrenme ve görüntü analizinde kullanılan derin öğrenme modelleri Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi (GBAD), 6 (3), 85- 104, 2017.
- [21] E. Seyyarer F. Ayata, T. Uçkan, A. Karcı, Derin öğrenmede kullanılan optimizasyon algoritmalarının uygulanması ve kıyaslanması, *Anatolian Journal of Computer Sciences*, 5 (2), 90-98, 2020.
- [22] D. P. Kingma ve J. Ba, Adam: A method for stochastic optimization, 2014. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1412.6980>

[23] H. Badem, Parkinson hastalığının ses sinyalleri üzerinden makine öğrenmesi teknikleri ile tanımlanması, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2019. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.524658>.

[24] M. Hossin ve M.N. Sulaiman, A Review on Evaluation Metrics for Data Classification Evaluations,

International Journal of Data Mining & Knowledge Management Process, 5 (2), 01–11, 2015. <https://doi.org/10.5121/ijdkp.2015.5201>.

[25] F. Chollet, Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2017.





Novel true random bit generation and its audio encryption application with Lorenz chaotic circuit-based entropy source

Lorenz kaotik devre tabanlı entropi kaynağı ile özgün gerçek rasgele sayı üretimi ve ses şifreleme uygulaması

Esra İnce¹ , Barış Karakaya^{2,*} , Mustafa Türk³ 

^{1,2,3} Fırat University, Faculty of Engineering, Department of Electrical-Electronics, 23200, Elazığ, Türkiye

Abstract

This paper introduces a methodology for generating secure cryptographic key bits from analog values obtained from the Lorenz chaotic circuit. The analog values are transferred from the chaotic circuit to the computer via an Analog Discovery-2 device and then post-processed by using a fixed-point number representation format and Von-Neumann corrector for the sampled values on the MATLAB program. By employing this method, the analog values are digitized and randomized as the main idea is to obtain secure and efficient statistically random bits. Furthermore, the generated random bits are utilized for secure audio encryption by demonstrating a practical application of the proposed methodology. In addition to the classical randomness test criteria, NIST 800.22 statistical test suite, the throughput bit stream is also subjected to Chi-square and FIPS 140-1 tests to further evaluate its effectiveness. The results of these comprehensive tests confirm the successful performance of the proposed system in generating statistically random bits and its secure audio encryption system. The utilization of the Lorenz chaotic circuit as an entropy source in generating true random bits for secure audio transmission applications showcases the potential of the proposed system.

Keywords: Audio encryption; Chaos; Post-processor; Random number generator; Statistical tests

1 Introduction

In recent years, chaos-based cryptography has gained increasing attention due to its inherent complexity and unpredictability while generating true random numbers [1]. Random number generation is a fundamental requirement in many cryptographic applications and secure communication systems. The quality and unpredictability of the generated random numbers play a crucial role in ensuring the security and reliability of this kind of system [2].

In the literature, chaos-based true random number generator (TRNG) designs are very popular at both discrete and continuous time chaotic systems are preferred as entropy sources of TRNG. In [3], a novel chaos-ring-based TRNG design proposed with high operating frequency and high throughput has been performed in favor of the FPGA platform. As an entropy source, the chaotic oscillator is

Öz

Bu makale, Lorenz kaotik devresinden elde edilen analog değerlerle güvenli kriptografik anahtar bitleri üretme yöntemini tanıtmaktadır. Analog değerler, kaotik devreden Analog Discovery-2 cihazı aracılığıyla bilgisayara aktarılır ve ardından MATLAB programında örnekleme değerleri için sabit noktalı sayı formatı ve Von-Neumann düzeltici kullanılarak işlenir. Bu yöntemi kullanarak, ana fikir güvenli ve verimli istatistiksel olarak rasgele bitler elde etmektir, bu nedenle analog değerler sayısallaştırılır ve rasgele hale getirilir. Ayrıca, önerilen yöntemin pratik bir uygulamasını göstererek üretilen rasgele bitler güvenli ses şifreleme için kullanılmaktadır. Klasik rasgelelik test kriteri olan NIST 800.22 istatistiksel test paketine ek olarak, üretilen bit dizisi ayrıca Chi-square ve FIPS 140-1 testlerine tabi tutularak etkinliği daha fazla değerlendirilmektedir. Bu kapsamlı testlerin sonuçları, önerilen sistemin istatistiksel olarak rasgele bitler üretme ve güvenli ses şifreleme sisteminde başarılı bir performans sergilediğini doğrulamaktadır. Lorenz kaotik devresinin bir rasgelelik kaynağı olarak kullanılması, önerilen sistemin potansiyelini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Ses şifreleme; Kaos; Son-işlemci; Rasgele sayı üretici; İstatistiksel testler

preferred and the 32-bit IQ-Math fixed point number standard is examined in FPGA programming language. Gong et. al. in 2022 [4], proposed a new 4D chaotic system with hidden attractors and self-excited attractors and they used this chaotic system as an entropy source of RNG to encrypt images securely. In [5], the author has proposed a novel RNG in which the entropy source is a fractional order chaotic Chua system [6] that is one of the most and first popular chaotic systems in the literature. In this study, a fractional order version of the Chua chaotic system is used and the advantages of the fractional order computing technique are put forward.

Among various chaotic systems, the Lorenz system has emerged as a popular choice to be used as an entropy source of random number generator (RNG) designs. The Lorenz system is a three-dimensional autonomous system that

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: bkarakaya@firat.edu.tr (B. Karakaya)

Geliş / Received: 06.12.2023 Kabul / Accepted: 27.01.2024 Yayınlanma / Published: 15.04.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1401243

exhibits chaotic behavior at specific parameter configurations of the differential equations characterized by its sensitivity to initial conditions and the presence of a strange attractor [7]. This chaotic behavior makes the Lorenz system an attractive candidate for random number generation applications. Several studies are using the Lorenz system itself [8], its discrete-time implementation on FPGA [9], and an improved version of the system [10]. Especially, in all studies, complex and high flexibility properties of the Lorenz system are attractive for it in cryptographic applications such as optimization for initial value space [11], secure random bit generation [12], and image encryption [13].

In this context, we propose a novel method for generating true random bits (TRB) from the output of a continuous-time integer-order Lorenz chaotic circuit [14]. The analog values of the state variables of the system are sampled and stored by using the Analog Discovery-2 device and transferred to the computer for post-processing in MATLAB. We employ the fixed-point number representation format and Von-Neumann corrector for the sampled values to obtain the cryptographic key bits from the digitized signals, which provides a good balance between accuracy and computational complexity.

The obtained true random bits (TRB) are then utilized for secure audio communication by encrypting and decrypting any public audio data. The proposed system provides a high level of security, as the key generation process is based on the inherent randomness and complexity of the chaotic system [15]. The use of real analog values of state variables from the chaotic circuit provides an additional layer of security to the generated random bits as they are inherently unpredictable and difficult to reproduce without the post-processor algorithm. Furthermore, the usage of the fixed-point number representation format and Von-Neumann corrector together is a novelty for digitizing any analog values. Overall, the proposed TRB generation system and the post-processor algorithm are utilized for the potential of secure audio transmission application.

Herewith this introduction; numerical analysis, chaotic behavior, and the electronic circuit implementation of the Lorenz system are detailed in Section 2. The structure of the proposed post-processor algorithm, TRB design with Lorenz chaotic circuitry, and audio encryption application is given in Section 3 where entropy source, fixed-point number representation format-based digitizer algorithm, Von-Neumann corrector, and XOR process for encryption are detailed. The statistically randomness of the proposed TRB design is proven with NIST, Chi-Square, and FIPS 140-1 tests, and histogram analysis of the proposed audio encryption application is examined in Section 4. In the end, future works and conclusions are discussed.

2 Material and methods

2.1 Entropy source: Integer order chaotic Lorenz system and its electronic circuit

The Lorenz chaotic system refers to a mathematical model that exhibits chaotic behavior over continuous time. It is based on the Lorenz system, which was originally introduced by Edward Lorenz in 1963 as a simplified model

of atmospheric convection [7]. The Lorenz system consists of a set of three nonlinear ordinary differential equations that describe the evolution of three variables: x , y , and z . These variables represent the state of the system and describe its position in the three-dimensional phase space;

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \sigma(y - x) \\ \dot{y} &= x(\rho - z) - y \\ \dot{z} &= xy - \beta z\end{aligned}\quad (1)$$

where σ , ρ , and β are called control parameters [16]. The chaotic behavior (*the strange attractor*) is observed when $(\sigma, \rho, \beta) = (10, 28, 8/3)$ and the initial conditions $(x_0, y_0, z_0) = (0.02, 0.02, 0.02)$ as shown in Figure 1. The behavior of the Lorenz chaotic system is characterized by sensitivity to initial conditions, meaning that small changes in the initial state can lead to significantly different trajectories over time. This property is one of the defining features of chaotic systems.

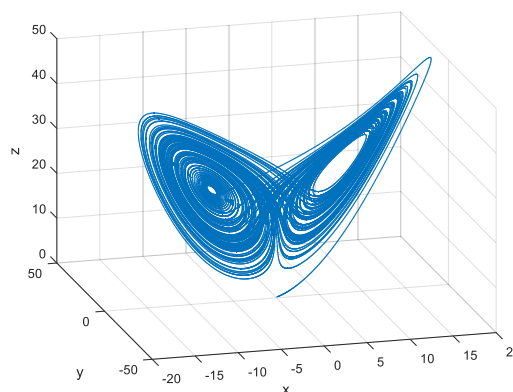


Figure 1. 3D phase portrait of Lorenz system; the strange attractor

Chaos dynamical analysis is a branch of study within the field of dynamical systems that explores the fascinating behavior of chaotic systems. Chaos refers to a complex and seemingly random behavior that arises from deterministic systems characterized by sensitivity to initial conditions. By using Lyapunov exponents and bifurcation diagrams for the dynamic analysis of the system, the study can gain insight into the nonlinear properties of the system and understand its chaotic behavior. For example, positive Lyapunov exponents suggest that the system is exhibiting chaotic behavior, and bifurcation diagrams can reveal how the system's behavior changes as a parameter is varied.

Since the Lorenz system has three state variables, and the system has three Lyapunov exponents. These exponential values were obtained as $\lambda_1 = 0.783$, $\lambda_2 = 0.014$, and $\lambda_3 = -14.47$ at steady state as shown in Figure 2. a. In the system for which three or more Lyapunov exponential values are calculated, if the condition $\lambda_1 > 0$, $\lambda_2 \cong 0$, $\lambda_i < 0$ is met for $i = 3 \dots n$, it is said to exhibit chaotic behavior. Furthermore, how the system changes despite the parameter change is observed with the bifurcation diagram. The behavior of the system despite the change of the β parameter for the z state variable is shown in Figure 2. b.

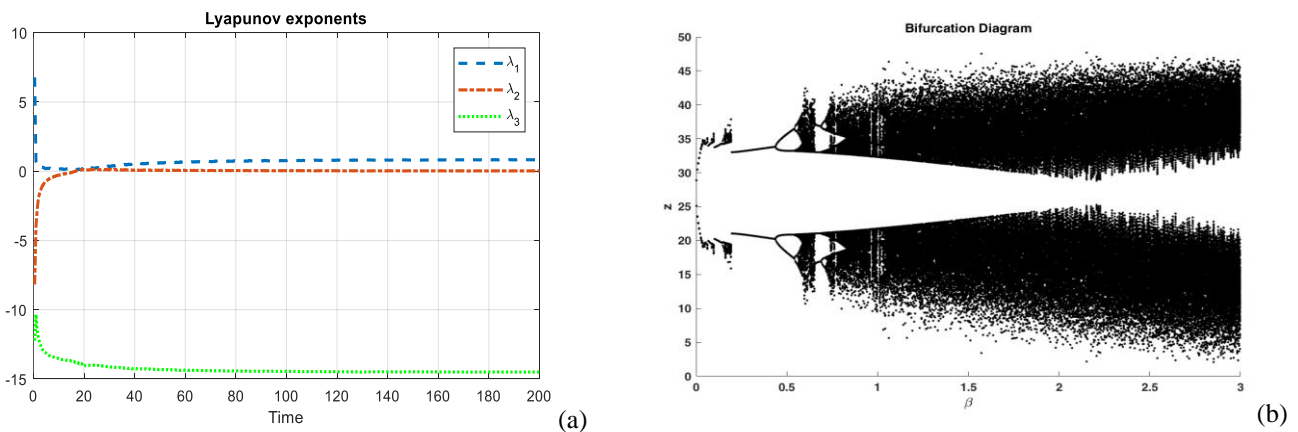


Figure 2. a) Variation of Lyapunov exponents, b) bifurcation diagram for the interval $\beta \in [0,3]$ of the Lorenz system

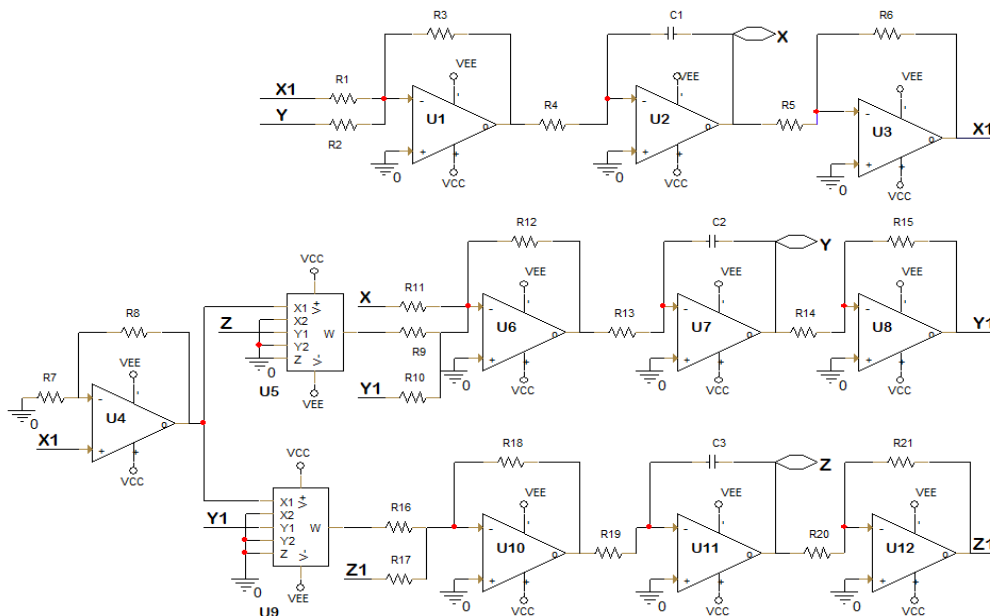


Figure 3. Electronic circuit realization of the Lorenz chaotic system in Orcad-Pspice environment. Components: $R_1 = R_2 = R_8 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_3 = R_5 = R_6 = R_{10} = R_{12} = R_{14} = R_{15} = R_{18} = R_{20} = R_{21} = 100 \text{ k}\Omega$, $R_4 = R_7 = R_{13} = R_{19} = 1 \text{ k}\Omega$, $R_9 = R_{11} = R_{16} = 3.3 \text{ M}\Omega$, $R_{17} = 39 \text{ k}\Omega$, $C_1 = C_2 = C_3 = 220 \text{ nF}$, $V_{CC} = -V_{EE} = 15 \text{ V}$; U_5 and U_9 are AD633 analog multipliers where the other integrated circuits are TL082 general purpose operational amplifiers

Thus, when the three-dimensional change of the system, bifurcation diagram, and Lyapunov exponents are examined, it is seen that the Lorenz system exhibits chaotic behavior by the definition of strange attractive.

In the proposed TRB design, the Lorenz system is used as an entropy source to obtain a chaos-based random bit stream. This study aims to utilize the Lorenz chaotic system for generating true random bits. Hence, the electronic circuitry for the system is designed using the Orcad-Pspice environment, and the corresponding configuration is illustrated in Figure 3. In this circuit design, regarding to the power supply limitation of the circuit, the Lorenz system differential equations are scaled as $\frac{1}{20}$, $\frac{1}{20}$, $\frac{1}{50}$ for the state variables x , y and z respectively. Active circuit elements such as TL082 operational amplifiers, AD633 analog multiplier

circuits, and passive circuit components (resistor and capacitor) are used to implement the equations of the chaotic systems [17, 18].

The initial condition of the state variables for each circuitry is applied as the initial voltage value of integration capacitors on the circuit. The simulation outcomes of electronic circuitries are exported from the Orcad-Pspice environment to the computer to plot and analyze the behavior of the state variables. The electronic circuit implementation of a Lorenz chaotic system is achieved within the Orcad-Pspice environment. After obtaining the desired results by analyzing the attractor observation, the electronic circuit board is designed finally on board. To gain insights into the dynamics and behavior of the Lorenz chaotic system, the outputs of each dimension are visually displayed utilizing high-speed oscilloscopes. The experimental setup allowed

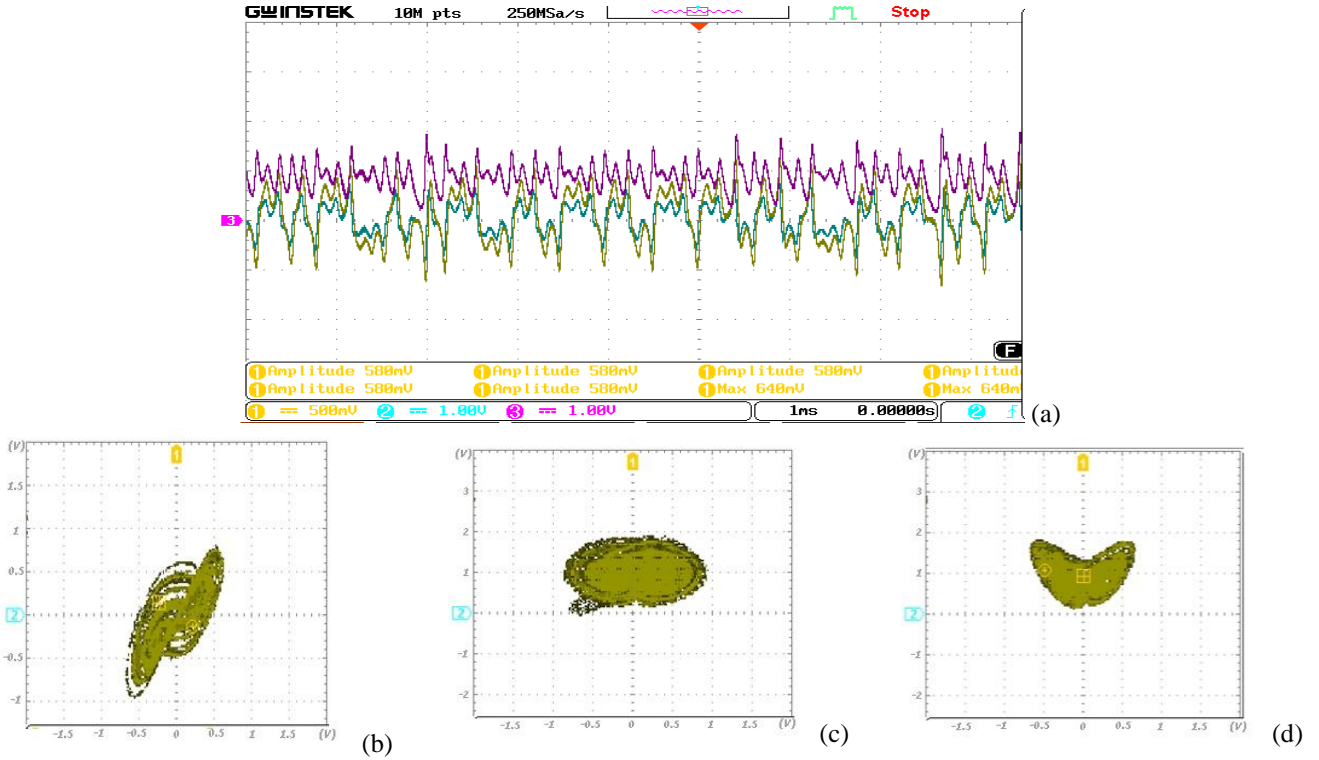


Figure 4. The oscilloscope outputs display a) the time domain representation of state variables and b) x-y, c) x-z, d) y-z phase portraits of the Lorenz chaotic circuit

for the direct observation and verification of the anticipated chaotic behavior, thereby affirming the precision of the circuit design. The circuit design incorporates the necessary components and connections to accurately emulate the behavior of the chaotic system. Furthermore, Figure 4 displays the time domain representation of the state variables and the phase portraits of Lorenz chaotic system measured from the electronic circuit, providing a visual representation of the dynamic behavior in phase space. These phase portraits depict the trajectories and attractors associated with the Lorenz chaotic system, enabling a deeper understanding of its complex dynamics. Together, these figures illustrate the successful implementation of the electronic circuit and provide valuable insights into the behavior of the Lorenz chaotic system.

2.2 Proposed TRB design, statistical test results, and audio encryption system

The proposed TRB design and its procedure for audio encryption and decryption are illustrated in Figure 5. As an entropy source of TRB design, Lorenz chaotic circuit outputs, specifically the x and y outputs, are subjected to quantization in MATLAB due to their analog values ranging from negative to positive. The scaled x and y state variables of the system observed from the electronic circuit vary -1 to $+1$.

The fixed-point binary conversion algorithm is chosen as the quantization method as digitizer algorithm on MATLAB where each analog value consists of 16 bits. Out of these 16 bits, 1 bit is assigned for the sign, 1 bit for the integer part, and the remaining 14 bits for the fractional part of the analog

value. A total of 2 million values are obtained from the Lorenz circuit board at a frequency of 25 kHz and a period of 40 microseconds.

Each state variable of the Lorenz system (x and y) is inputted to a fixed-point binary conversion algorithm. For each analog value input, a 10-bit output is obtained with the sample number as 4. Thus, a total of 5 million serial bits are obtained for both the x and y outputs. These bits are further processed using the Von-Neumann corrector. As a result, 1074403 serial bits are obtained from the x output and 1052726 serial bits from the y output through the final processing algorithm. By passing these obtained digital bits through an XOR gate, a secure key of 1052726 bits is derived. To ensure the confidentiality and security of the audio information, and make it resistant to unauthorized access or deciphering, the TRB has to pass all statistical tests such as NIST, FIPS 140-1, and Chi-Square tests.

2.2.1 NIST statistical test suite

The effectiveness of the proposed true random bit generator design, TRB has to pass some popular statistical tests. Therefore, the generated bit stream is applied to NIST 800.22 statistical randomness tests [19, 20]. Table 1 presents the results of the NIST tests conducted on the original audio data generated TRB and encrypted audio. According to the test results, the original audio data passed only two of the tests, indicating a poor behavior of randomness. On the other hand, both the generated TRB and the encrypted audio successfully passed all the statistical tests, demonstrating a high degree of randomness and robustness against cryptographic attacks. The statistical validation of the

randomness of the bit stream provides strong evidence for its quality and suitability in cryptographic applications.

2.2.2 FIPS 140-1 tests

FIPS 140-1 is a standard that establishes criteria for evaluating the security of cryptographic modules. The test requirements defined in FIPS 140-1 aim to ensure that the modules demonstrate sufficient levels of randomness and unpredictability. There are four different tests in the module.

In the Poker Test, a 20.000-bit block is tested by dividing it into 5.000 consecutive 4-bit chunks. The occurrences of each of the 16 possible chunks (with 15 degrees of freedom) are counted, and they are represented by $f(i)$. To evaluate the test, X is calculated using the following equation:

$$X = \left(\frac{16}{500}\right) * \sum (f(i)^2) - 5000 \quad (2)$$

In this equation, $f(i)$ represents the occurrences of each value for the 4-bit chunks. The summation (\sum) is performed over all the 16 possible chunks. Once X is calculated, it is compared to the specified ranges to determine the outcome of the test. For the FIPS 140-2 test to be considered passed, X must fall within the range of 2.16 to 46.17. On the other hand, FIPS 140-1 has slightly different requirements, requiring X to be within the range of 1.03 to 57.4. Both versions use the same equation to evaluate the test, but they have distinct passing criteria.

The Monobit Test involves counting the number of 1's in a 20.000-bit block. Let's denote the number of 1's as Y . For FIPS 140-1, the test is passed if Y is between 9,654 and 10.346. The goal of this test is to ensure that the number of 1's in the block is within the specified ranges, indicating a satisfactory distribution of ones and zeros [21].

The Runs Test examines the presence of consecutive sequences, known as runs, consisting of either 1's or 0's within a 20.000-bit block. This test count runs with lengths ranging from 1 to 6. The passing intervals for this test are specified in Table 2 for the FIPS 140-1 version of the test. The purpose of this test is to evaluate the distribution and occurrence of runs within the block, ensuring they fall within the designated passing intervals as defined in the FIPS 140-1 standard [22].

The Long Run Test examines the presence of extended sequences, known as long runs, within a 20.000-bit block. In the context of FIPS 140-1, a long run is defined as a consecutive series of identical values exceeding 34 bits. If the number of consecutive identical values exceeds this threshold, the test is considered failed under FIPS 140-1.

These tests, along with other requirements, ensure that cryptographic modules conform to the security standards defined by FIPS 140-1. In Table 2, we can find the conditions and results of all the tests associated with this test module. The proposed design has successfully passed all the tests present in the FIPS 140-1 module.

2.2.3 Chi-Square test

The chi-square test is a statistical test used to determine the significance of the relationship between two categorical variables. It compares observed and expected frequencies and calculates a chi-square statistic. This statistic measures the deviation from randomness. By comparing the chi-square statistic to a table of critical values, a p-value is obtained. If the p-value is below a predetermined significance level (e.g., $\alpha = 0.05$), the null hypothesis is rejected, indicating a significant relationship.

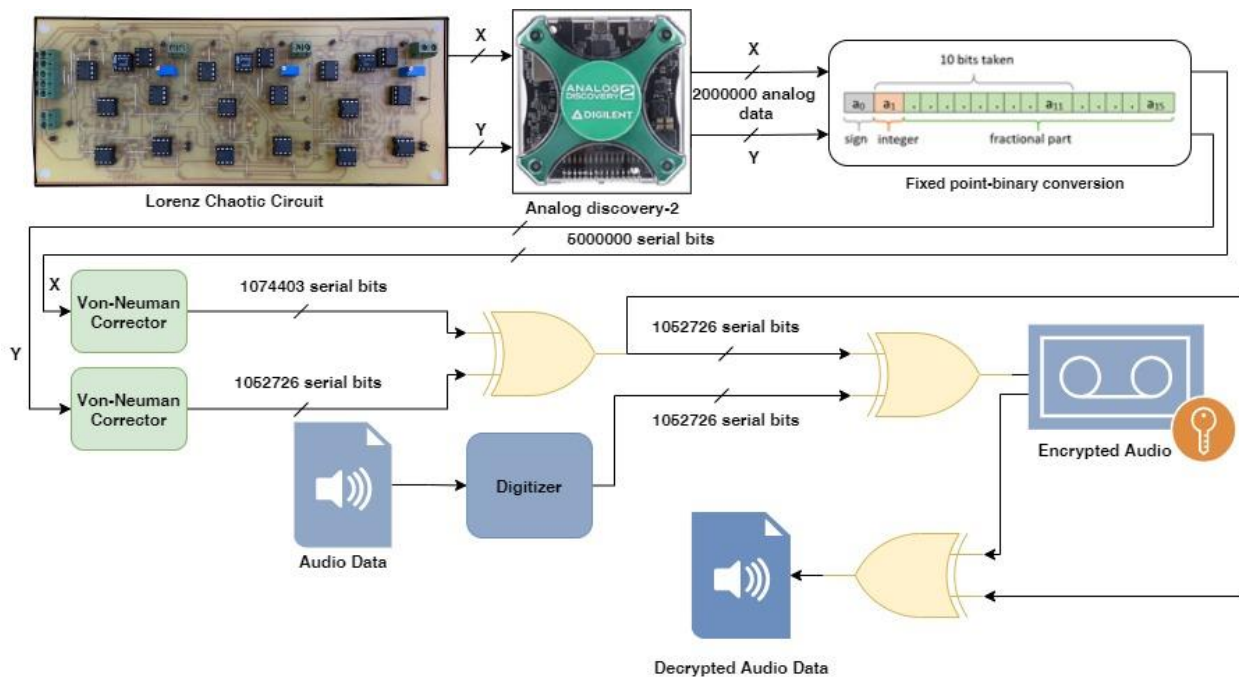


Figure 5. Experimental setup for audio encryption

2.2.4 Chi-Square test

If the p-value is above the significance level, the null hypothesis is accepted, suggesting no relationship [23].

In this study, the chi-square test is applied to the entire bit sequence with a length of 1052726. The test aimed to determine if the sequence exhibited randomness. The obtained p-value was 0.42530455279488244, indicating that there is no significant deviation from randomness. Additionally, the chi-square statistic is calculated as 0.6356111318508977. Based on these findings, we cannot reject the null hypothesis, indicating that the bit sequence can be considered random.

2.2.5 Encryption process

After the confirmed randomness, a simple audio encryption process is performed, utilizing the generated true random bit stream to encrypt the audio data securely. The original audio source (the mp3 version of Beethoven's 9th symphony) contains 5998269 analog values ranging from 0 to 255 after the digitizing process on MATLAB. After digitizing the audio source, a portion of the resulting digital audio data, specifically 1052726 bits, is selected as the length of the generated TRB and used for encryption. The encryption process consists of logical XOR operation of digitized audio data and the generated true random bits which is statistically proven by the means of randomness.

The whole encryption algorithm and MATLAB codes are given in Table 3. In Figure 6, MATLAB outputs are provided for the digitized original audio data, the generated TRB, the encrypted digital data, and the decrypted audio data, respectively. To enhance the visual representation, 1000 bits from each source are selected and displayed in the figures. These samples allow for a more meaningful interpretation of the transformations and operations performed on the audio data during the encryption and decryption processes. After the decryption stage, it is better to determine the bit error rate (BER) by using the original digital audio data and decrypted digital audio data in order to obtain how much data has been changed after decryption process. The expected BER is 0 if the encryption application is executed successfully. The BER is determined by following equation;

$$BER = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \frac{HD(r_k, r'_k)}{n} * \%100 \quad (3)$$

where M stands for digital data length, HD for hamming distance, r_k for k -th bit of the original digital data and r'_k for k -th bit of the decrypted digital data. The encryption-decryption system can successfully recover the original audio data with zero error as the BER is determined 0.

Table 1. NIST test results for proposed TRB design

NIST TESTS (1052726 BIT)	P- value Original Audio	Result	P- value TRB	Result	P- value Encrypted Audio	Result
Frequency (monobit) Test	-	Failed	0.4253	Passed	0.7154	Passed
Frequency Test within a Block	-	Failed	0.901	Passed	0.9415	Passed
Runs Test	-	Failed	0.5923	Passed	0.1148	Passed
Test for the Longest Run of Ones in a Block	-	Failed	0.0614	Passed	0.725	Passed
Binary Matrix Rank	0.4805	Passed	0.2222	Passed	0.9715	Passed
Discrete Fourier Transform Test	-	Failed	0.9672	Passed	0.2678	Passed
Non-overlapping Template Matching Test	-	Failed	0.0691	Passed	0.4942	Passed
Overlapping Template Matching Test	-	Failed	0.5482	Passed	0.4548	Passed
Maurer's Universal Statistical Test	-	Failed	0.0488	Passed	0.4351	Passed
Linear Complexity Test	-	Failed	0.2903	Passed	0.12	Passed
Serial Test 1/2	-	Failed	0.55 / 0.74	Passed	0.93 / 0.886	Passed
Lempel Ziv Test	75350	Passed	77710	Passed	77815	Passed
Approximate Entropy Test	-	Failed	0.3268	Passed	0.8088	Passed
Cumulative Sums Test	-	Failed	0.4377	Passed	0.668	Passed
Random Excursions Test	-	Failed	0.3271	Passed	0.6227	Passed
Random Excursions Variants Test	-	Failed	0.7311	Passed	0.6288	Passed

Table 2. FIPS 140-1 test result

FIPS 140-1 TESTS	Criteria for Success	Values	Result
Monobit Test	$9654 < x < 10346$	10163	Successful
Poker Test	$1.03 < x < 57.4$	16.454400000000533	Successful
Long Run Test	$dvalue < 34$	3	Successful
	For 0		
Runs Test-0	[2267-2733,1079-1421,502-748,223-402,90-223,90-223]	[2395, 1223, 677, 320, 151, 167]	Successful
	For 1		
Runs Test-1	[2267-2733,1079-1421,502-748,223-402,90-223,90-223]	[2496, 1194, 596, 315, 182, 151]	Successful

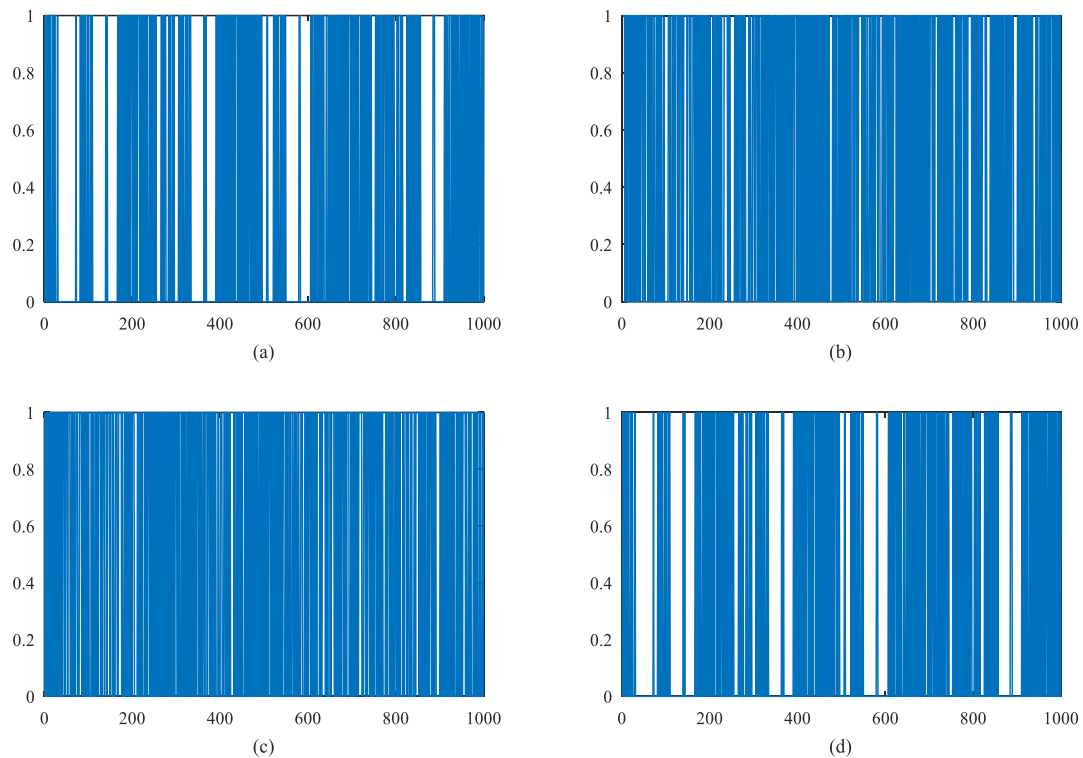


Figure 6. a) Original audio digital data (1000 bit) b) True random digital data (1000 bit) c) Encrypted digital data (1000 bit) d) Decrypted digital data (1000 bit)

3 Results and discussion

The most popular analysis method that demonstrates the effectiveness of the design is histogram analysis. The distribution of the audio data can be displayed using histogram analysis. Flat audio data has an uneven and centralized distribution of values. The histogram of audio data that has been encrypted using the encryption algorithm is anticipated to have a smooth distribution of values. The performance of encryption and attack vulnerability increase with the smoothness of the histogram of the encrypted audio data. In Figure 7, histogram analyses are presented for the original audio data, the generated TRB, the encrypted audio data, and the decrypted audio data, respectively. Upon examining these graphs, the unique distributions observed for the generated TRB and encrypted audio data indicate the success of the proposed audio encryption algorithm.

Furthermore, the similarity between the histograms of the original audio data and the decrypted audio data signifies a successful decryption process. The consistency in histogram shapes validates the accuracy of the decryption operation.

In Table 4, a comparison of our proposed system and the TRNGs in the literature is given. When examining different TRNGs (True Random Number Generators) with various entropy sources, it is observed that the designs are implemented using simulation, FPGA, and analog circuits. In these studies, the randomness of the generated true random bits is mostly validated through the NIST test suite. In this study, the design is implemented using an analog circuit, and the randomness of the generated bits is demonstrated through several different tests. In addition to testing the generated bits, histogram analysis is performed on the encrypted and decrypted audio.

Table 3. Proposed encryption algorithm procedure

<p>Step 1: Chaotic Lorenz y state variable and its digitizing process codes on MATLAB, the same code is applied for the x state variable as well which is transferred from the electronic circuit to the PC via Analog Discovery-2.</p> <pre> q = quantizer('fixed',[16 14]); j=1; dim=length(y); for k=1:4:dim s_y= num2hex(q, y(k)); y_bin(j,:)= hex2bin(q, s_y); j=j+1; end [a b]=size(y_bin); for i=1:1:a yy=logical(y_bin(i,:) '- '0'); y_final((i-1)*(b-6)+1):i*(b-6),1)=yy(2:11); end y_final=double(y_final); </pre> <p>Step 3: Digitizing the plain audio data</p> <pre> fid=fopen('beethoven9thsymphony.mp3','r'); mp3_content=fread(fid, [1 inf], '*uint8'); fclose(fid); binaryform=dec2bin(mp3_content); binaryform2=binaryform(1:132000,:); [a b]=size(binaryform2); for i=1:1:a reg=logical(binaryform2(i,:) '- '0'); mp3_bin((i-1)*(b)+1):i*(b),1) = reg; end mp3_bin_son=double(mp3_bin(1:length(TRB))); </pre>	<p>Step 2: Pseudo code implementation of Von-Neumann corrector algorithm for Lorenz y state variable on MATLAB, the same code is applied for the x state variable as well.</p> <pre> dim=length(y_final); k=1; for j=1:2:dim sel(j)= y_final (j); sel(j+1)= y_final (j+1); if sel(j) < sel(j+1) key_y(k)=0; k=k+1; elseif sel(j) > sel(j+1) key_y(k)=1; k=k+1; else k=k; end end key_y=key_y'; </pre> <p>Step 4: True random bit generation process by using XOR and the output of Step 2 for both x and y state variables. Encryption and decryption of digitized audio data with TRB</p> <pre> dim=length(key_y); for i=1:dim TRB(i)= xor(key_x(i),key_y(i)); end TRB=double(TRB'); for i=1:dim encrypted(i)= xor(TRB(i), mp3_bin_son (i)); end encrypted=double(encrypted'); for i=1:dim decrypted(i)= xor(TRB (i),encrypted(i)); end decrypted=double(decrypted'); </pre>
--	--

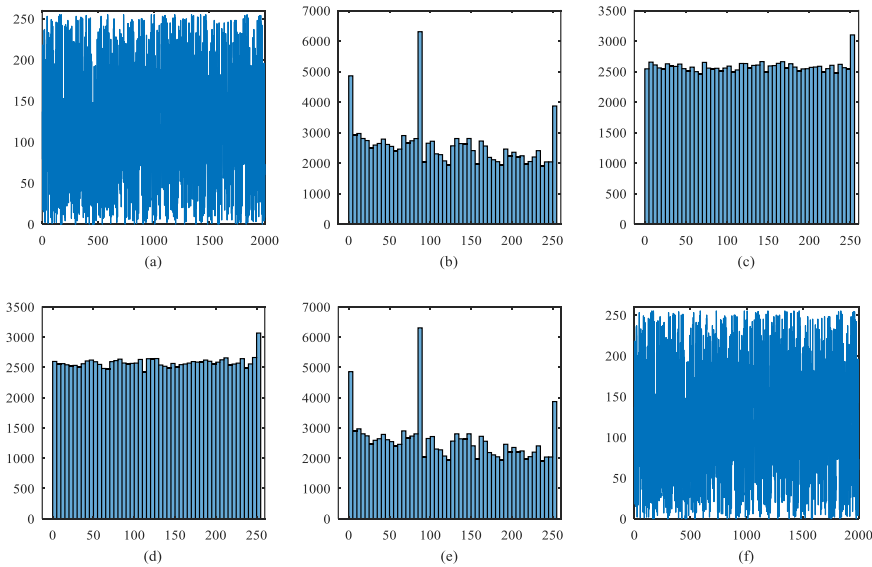


Figure 7. a, b) Original audio and its histogram c) TRB histogram d) Encrypted audio histogram e, f) Decrypted audio and its histogram

Table 4. Literature comparison for TRNG designs

Reference	Generator Type	Entropy Source	Realization Type	Post-processor	Tests
[24]	TRNG	SAR Residue	Analog circuit	-	NIST
[25]	TRNG	Chaotic Map	FPGA	-	NIST
[26]	TRNG	EM Waves	FPGA	-	Online health test
[27]	TRNG	PLL period jitter	FPGA	Yes	NIST, Kolmogorov-Smirnov test
[28]	TRNG	three-terminal magnetic tunnel junction	Simulation	-	-
[29]	TRNG	3T-MTJ	Simulation	-	NIST
[30]	TRNG	Chaotic Map	Analog Circuit	Yes	NIST
[31]	TRNG	Bistable Josephson Junction	Simulation	-	NIST
[32]	TRNG	Audio Signal	Simulation	-	NIST, TestU01
Proposed design	TRNG	Chaotic Map	Analog Circuit	Yes	NIST, FIPS 140-1, Chi-Square tests

4 Conclusions

In this study, audio encryption is successfully performed using the Lorenz chaotic circuit. The analog values obtained from the circuit board output contributed to generating TRB. The reliability of the generated key bits is verified through NIST 800.22 statistical randomness tests, Chi-Square, and FIPS 140-1 tests. The results obtained from this implementation demonstrate the versatility of the proposed design, which can be applied not only to ensure secure communication but also to address information security requirements in various domains. Future research aims to fully implement secure key generation in a hardware-based approach and conduct more independent studies that are less reliant on software environments. These advancements will offer new possibilities in information security and contribute to the development of more reliable communication systems.

Acknowledgement

This work was supported by The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Project Number: 121E210.

Conflict of Interest

There is no conflict of interest.

Similarity Rate (Turnitin): 14%

References

[1] V. Lynnyk, N. Sakamoto, S. Čelikovský, "Pseudo-random number generator based on the generalized Lorenz chaotic system," IFAC-PapersOnLine, 48 (18), pp. 257-261, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.11.046>

[2] M. D. Gupta, R. K. Chauhan, "Hardware efficient pseudo-random number generator using Chen chaotic system on FPGA," Journal of Circuits, Systems and Computers, 31 (3), 2250043, 2022. <https://doi.org/10.1142/S0218126622500438>

[3] İ. Koyuncu, et al., "Design, FPGA implementation and statistical analysis of chaos-ring based dual entropy

core true random number generator," Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 102, pp. 445-456, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10470-019-01568-x>

[4] L.-H. Gong, et al., "New 4D chaotic system with hidden attractors and self-excited attractors and its application in image encryption based on RNG," Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 591, 126793, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.126793>

[5] F. Ozkaynak, "A novel random number generator based on fractional order chaotic Chua system," Elektronika ir Elektrotechnika, 26 (1), pp. 52-57, 2020. <https://doi.org/10.5755/j01.eie.26.1.25310>

[6] L. O. Chua, "Chua's circuit: An overview ten years later," Journal of Circuits, Systems, and Computers, 4 (2), pp. 117-159, 1994. <https://doi.org/10.1142/S0218126694000090>

[7] E. N. Lorenz, "Deterministic nonperiodic flow," Journal of Atmospheric Sciences, 20 (2), pp. 130-141, 1963. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020<0130:DNF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2)

[8] M. S. Azzaz, et al., "Design and FPGA implementation of TRNG based on a new multi-wing attractor in Lorenz chaotic system," The European Physical Journal Special Topics, 230 (18), pp. 3469-3480, 2021. <https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-021-00234-6>

[9] A. A. Rezk, et al., "Reconfigurable chaotic pseudo random number generator based on FPGA," AEU-International Journal of Electronics and Communications, 98, pp. 174-180, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2018.10.024>

[10] C. Zou, et al., "Image encryption based on improved Lorenz system," IEEE Access, 8, pp. 75728-75740, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2988880>

[11] G. Yildirim, E. Tanyildizi, "An innovative approach based on optimization for the determination of initial conditions of continuous-time chaotic system as a random number generator," Chaos, Solitons & Fractals,

- 172, 113548, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2023.113548>
- [12] B. Arıcıoğlu, S. Kaçar, "Circuit Implementation and PRNG Applications of Time Delayed Lorenz System," *Chaos Theory and Applications*, 4 (1), pp. 4-9, 2022. <https://doi.org/10.51537/chaos.976593>
- [13] B. Karakaya, "Chaotic System-based Pseudo Random Bit Generator and Post-processor Design for Image Encryption," in Proc. 2022 13th National Conference with International Participation (ELECTRONICA), IEEE, 2022.
- [14] C. García-Grimaldo, et al., "FPGA Implementation of a Chaotic Map with No Fixed Point," *Electronics*, 12 (2), 444, 2023. <https://doi.org/10.3390/electronics12020444>
- [15] S. M. Basha, P. Mathivanan, A. B. Ganesh, "Bit level color image encryption using Logistic-Sine-Tent-Chebyshev (LSTC) map," *Optik*, 259, 168956, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.168956>
- [16] Y. Yu, et al., "Dynamic analysis of a fractional-order Lorenz chaotic system," *Chaos, Solitons & Fractals*, 42 (2), pp. 1181-1189, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2009.03.016>
- [17] M. Preishuber, et al., "Depreciating motivation and empirical security analysis of chaos-based image and video encryption," *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 13 (9), pp. 2137-2150, 2018. <https://doi.org/10.1109/TIFS.2018.2812080>
- [18] Q. Lai, L. Wang, "Chaos, bifurcation, coexisting attractors and circuit design of a three-dimensional continuous autonomous system," *Optik*, 127 (13), pp. 5400-5406, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.03.014>
- [19] B. Karakaya, A. Gülten, M. Frasca, "A true random bit generator based on a memristive chaotic circuit: Analysis, design and FPGA implementation," *Chaos, Solitons & Fractals*, 119, pp. 143-149, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2018.12.021>
- [20] A. Rukhin, J. Soto, J. Nechvatal, M. Smid, E. Barker, S. Leigh, S. Vo, A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications. US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, 2001.
- [21] D. Hurley-Smith, C. Patsakis, J. Hernandez-Castro, "On the unbearable lightness of FIPS 140-2 randomness tests," *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 17, pp. 3946-3958, 2020. <https://doi.org/10.1109/TIFS.2020.2988505>
- [22] S. Çiçek, "Design and Implementation of an FPGA based Chaotic Communication System with a New Chaotic System," Ph.D. Dissertation, Sakarya University, Turkey, 2016.
- [23] A. Vardasbi, M. Salmasizadeh, J. Mohajeri, "Multiple-chi-square tests and their application on distinguishing attacks," in Proc. 2011 8th International ISC Conference on Information Security and Cryptology, IEEE, 2011. <https://doi.org/10.1109/ISCISC.2011.6062336>
- [24] A. Jayaraj, et al., "0.6–1.2 V, 0.22 pJ/bit true random number generator based on SAR ADC," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 67 (10), pp. 1765-1769, 2019. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2019.2949775>
- [25] C. Wannaboon, P. Ketthong, "A Simple Random-Bit Generator Implemented on FPGA Based on Signum Chaotic Map," in 2022 International Conference on Digital Government Technology and Innovation (DGTi-CON), IEEE, 2022.
- [26] S. Osuka et al., "A Study on Output Bit Tampering of True Random Number Generators Using Time-Varying EM Waves," in 2021 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), IEEE, 2021.
- [27] G. D. P. Stanchieri et al., "An FPGA-Based Architecture of True Random Number Generator for Network Security Applications," in 2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), IEEE, 2018.
- [28] S. Mukaida, N. Onizawa, and T. Hanyu, "Design of a low-power MTJ-based true random number generator using a multi-voltage/current converter," in 2018 IEEE 48th International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL), IEEE, 2018.
- [29] A. Tamakoshi, et al., "Design of an energy-efficient true random number generator based on triple read-write data-stream multiplexing of MTJ devices," in 2020 18th IEEE International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS), IEEE, 2020.
- [30] C. Wannaboon, P. Ketthong, and W. San-Um, "On-Chip True-Random Bit Generator Through a Robust Tent-Based Chaotic Map," in 2019 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS), IEEE, 2019.
- [31] E. Elmitwalli and S. Köse, "Bistable Josephson Junction-Based True Random Number Generator Without Inductors," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 70 (4), pp. 1615-1619, 2022. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2022.3226166>
- [32] T. Etem and T. Kaya, "Self-generated encryption model of acoustics," *Applied Acoustics*, 170, p. 107481, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107481>





Uçucu kül ve farklı seramik sektörü atıklarının kullanımı ile üretilen geopolimer harçların dayanım özellikleri

Mechanical properties of geopolymer mortars produced with fly ash and various ceramic industry wastes

Ayşe Eser¹ , Zahide Bayer Öztürk^{2,*} , İsmail İsa Atabey³ , Serhat Çelikten⁴ 

¹ Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 50300, Nevşehir Türkiye

² Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 50300, Nevşehir Türkiye

^{3,4} Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 50300, Nevşehir Türkiye

Öz

Türkiye'de seramik sektörü, ekonomik anlamda önemli bir paya sahip olup, ülkemiz seramik kaplama malzemeleri ve vitrifiye üretiminde lider konumdadır. Çanak-çömlek ürünleri seramik üretiminin bir başka kolunu oluşturmaktadır. Ancak, ilgili sektörde ıskartaya ayrılan hatalı ürünlerden kaynaklanan atıkların oluşması çevre kirliliği, depolama, tozlaşma sorunlarını beraberinde getirmekte ve atık üretim miktarı dikkate alındığında sektör atıklarının farklı alanlarda değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu çalışmada, seramik-karo fabrikası filtre-pres keki, vitrifiye ve çömlek atığının, farklı aktivatörlerle uçucu kül ile ve kül olmadan üretilen geopolimer harçların mekanik özellikleri incelenmiştir. Sıvı/bağlayıcı oranı 0.40 olan, NaOH ve Na₂SiO₃ içeren harç karışımları 24 saat boyunca 90°C sıcaklıkta ısıl küre tabi tutulmuştur. Numunelere 7, 28 günlük eğilme ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır. 28 günlük Na₂SiO₃ ile üretilen harçların eğilme dayanımlarının 4.4 MPa-11 MPa, NaOH ile üretilen harçların 3.4-7.6 MPa aralığında olduğu tespit edilmiştir. Basınç dayanımlarında ise seramik atıklarının ikili ve uçucu küllü üçlü karışımlarının 30 MPa'dan yüksek değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Çalışma seramik sektörü atıklarının geopolimer üretiminde başarıyla değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Seramik atıkları, Uçucu kül, Geopolimer, Mekanik özellikler.

1 Giriş

Seramik sektörü ülkemiz ekonomisinde önemli bir paya sahiptir. Seramik endüstrisi, her geçen gün gelişerek ülkemiz, dünyanın sayılı seramik üreten ülkelerinden biri konumuna gelmiştir. Türkiye'de seramik sektörünün lokomotif ürün grubu seramik kaplama malzemeleri ve seramik sağlık gereçleridir [1]. Seramik sektörü, hammadde açısından oldukça avantajlı konumdadır, ancak hammadde arama ve çıkarma işlemleri zayıftır. Öte yandan mevcuttaki havzalar korunamadığı için bu durum uzun dönemde firmalar için dezavantajlı duruma gelme riski taşımaktadır

Abstract

The ceramic industry holds a considerable position in Turkey's economy, with our country emerging as a frontrunner in the manufacturing of ceramic coating materials and sanitaryware. Pottery products form another distinct branch of ceramic production. The disposal of defective products in the industry leads to the generation of waste, causing environmental pollution and presenting challenges in terms of storage and disposal. Considering the substantial volume of waste produced, it becomes imperative to explore diverse avenues for the effective utilization of the sector's waste. The mechanical properties of geopolymer mortars produced by using ceramic tile factory filter-press cake, sanitaryware, and pottery wastes with and without fly ash with different activators were examined in this study. The mortar mixtures with a liquid/binder ratio of 0.40, incorporating NaOH and Na₂SiO₃, were subjected to thermal curing at 90°C for 24 hours. 7 and 28-day flexural and compressive strength tests were applied to the samples. The flexural strengths of mortars produced with Na₂SiO₃ for 28 days were found to be in the range of 4.4 MPa-11 MPa, while those produced with NaOH ranged from 3.4 to 7.6 MPa. The compressive strengths of ceramic waste binary mixtures and fly ash ternary mixtures surpassed values of 30 MPa. The study demonstrates that ceramic industry wastes can be effectively employed in geopolymer production.

Keywords: Ceramic wastes, Fly ash, Geopolymer, Mechanical properties

[2]. Günümüzde, ülke ve dünya nüfusunun artması ile tüketimin de doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir.

Doğal kaynaklar ve yaşanılan ortama bilinçli veya bilinçsiz şekilde zarar verilmesi ile meydana gelen istenmeyen durumlar "çevre kirliliği" olarak tanımlanmaktadır. Çeşitli endüstri kollarından doğaya salınan atıklar çevre kirliliğine sebep olabilmektedir. Ortaya çıkan atıkların miktarı göz önünde bulundurulduğunda, atık üretimi bakımından seramik sektörü de önemli bir paya sahiptir [3]. Ülkemizde 2018 yılı itibariyle 335 milyon m² seramik kaplama ürünleri ve 20,5 milyon adet seramik sağlık

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: z.ozturk@nevsehir.edu.tr. (Z. Bayer Öztürk)
Geliş / Received: 04.12.2023 Kabul / Accepted: 29.01.2024 Yayınlanma / Published: 15.04.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1400321

gereci (vitrikiye) üretilmiştir. Üretilen ürünlerin iyimser yaklaşımla %5'inin kusurlu olduğu gözetilirse yılda yaklaşık 320 bin ton civarında seramik atığı ortaya çıkmaktadır [4].

Seramik karo ve vitrikiye dışında bir diğer seramik ürün grubu da çanak-çömlek ürünleridir. Nevşehir, Kapadokya bölgesinin merkezinde yer almakta olup, ülkemizin en fazla turist çeken yerleşim merkezlerindedir. Kapadokya'da çömlekçilik önemli el sanatlarından biridir. Bölgede yer alan seramik atölyelerinin yanı sıra faaliyet gösteren çömlek fabrikaları saksılar, baskı ürünler, el yapımı küpler, bahçe seramikleri ve dökümlü şekillendirilmiş iç-dış mekân seramikleri üretmektedir [5]. Fabrikada üretim sonrası oluşan iskarta ürünler depolanarak muhafaza edilmekte, üretime geri dönüşümü çok az olması, görüntü kirliliği ve atık olarak bekletilmesi sebebiyle de stok sahasında depolama problemi oluşturmaktadır. Karşılaşılan bu durumla ilgili, kaynakların korunması ve üretim esnasında oluşacak atıkların farklı alanda kullanımı zorunlu hale gelmiştir [6].

İnşaat sektörü düşünüldüğünde, harç, beton ve çimento üretimi sırasında önemli oranda sera gazı ortaya çıkmaktadır. Çevresel zararları göz önüne alındığında, yan ürünlerin kullanımını ve toksik atıkların yapıya hapsedilmesiyle birlikte ısıya ve aşındırıcı çevre koşullarına dayanıklı malzemeler üreten geopolimerler, bu tür sorunlara alternatif çözümler sunabilir [7]. Geleneksel çimentoya göre geopolimer bağlayıcıların en önemli avantajlarından biri, daha az CO₂ salınımının olmasıdır. Bu durum, hammaddelerin yüksek sıcaklıkta kalsinasyon sürecine tabi olmaması sayesinde gerçekleşir. İnşaat sektöründeki öneminin ve teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, daha üstün özelliklere sahip olan geopolimerlerin önemi de artmıştır [8]. Günümüzde, geopolimer harç/beton üretiminde temel malzeme olarak atık seramik tozunun kullanılması, sürdürülebilirlik ve seramik sektörünün de atıklarının geri dönüşümüne yardımcı olması nedenleri ile ilgi görmektedir [9,10]. Yapılan çalışmalarda kırmızı kil seramik tozu [11], tuğla üretiminde oluşan ince atık tozlar [12], kırmızı çamur [13, 14], atık cam tozu [15], seramik karo atıkları [16-20], seramik sağlık gereci atıkları [21-23] kullanımlarının geopolimerlerin performansına etkileri değerlendirilmiştir.

Geopolimer için önemli ana malzemelerden biri, uçucu kül olarak bilinir [24]. Bu kül, kömür yanması sırasında termik santral bacalarından atmosfere yayılan mikron boyutundaki taneciklerin elektrostatik veya mekanik filtreler tarafından yakalanması ve kül silolarında toplanması ile elde edilen endüstriyel atıklardan biridir [25]. Geopolimerlerin üretiminde temel malzemelerden olan uçucu külün kullanım alanının artması ve bunun yanı sıra üretim yeri ile termik santral arasındaki mesafelerin uzaklığı da maliyeti artmıştır. Atık sınıfında yer alan uçucu kül, geopolimer üretimi için önemli malzemelerden biri haline gelmiştir. Ayrıca, uçucu külün mineral katkı olarak çimentoda, agrega olarak betonda, dolgu olarak zemin iyileştirmede ve yol uygulamalarında kullanılabilir olması maliyetin artmasına neden olmuş ve üreticileri farklı hammadde veya katı atık malzemelerine yönlendirmiştir [26]. Avrupa'da birçok farklı ülke kömürlü çalışan termik santrallerini kapatmaktadır. Avrupa ülkelerinde rüzgâr ve güneşten enerji üretilmesi

yaygınlaşırken, Türkiye mevcut kömürlü termik santrallerini açık tutmayı sürdürme çabasında olsa da yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım ve teşviklerin olması uçucu külün üretiminde önümüzdeki süreçte kısıtlamaların beklendiğini göstermektedir [27]. Uçucu kül yerine farklı seramik atıklarının ikame edilmesi, geopolimer harç üretiminde uçucu küle olan talebi azaltacaktır. Günlük üretimi yüksek olan bu seramik ürünlerin hatalı olanlarının iskartaya ayrılmasıyla oluşan atıklar fabrikalardan temin edilerek, üretilecek geopolimer harcın uçucu kül yerine kullanılmasının fiziksel ve mikroyapısal özelliklerde herhangi bir olumsuzluğa yol açmadan, özelliklere olan etkilerinin değerlendirilmesi, seramik atıklarının ürüne dönüştürülmesi ve geopolimer üretiminde alternatif bir hammadde kaynağı bulunmasına katkı sağlayacağı öngörülmektedir. Bu sayede üretimdeki maliyet düşecek ve seramik fabrikalarının üretiminde her yıl çok miktarda oluşan, üretim sahalarında bekletilen seramik atıklarının (filter-pres kek atığı, vitrikiye ve çömlek atıkları) hammadde olarak kullanımı sağlanmış olacaktır. Böylece hem seramik ve inşaat sektörüne hem de ülke ekonomisine önemli katkı sağlanmış olacaktır.

Literatür incelendiğinde bazı seramik atıkların kullanımını ele alan çalışmalar bulunmakta ancak pişme öncesi işletme havuzlarında biriken seramik karo kek atığının, vitrikiye atıklarının ve çömlek kırıklarının birlikte kullanımını ele alan çalışmalar bulunmamaktadır. Cüruf ve uçucu kül gibi yaygın kullanılan atıklara ek olarak seramik sektörü atıklarının geopolimer harçlarda geri dönüşümünün sağlanması ve atıkların değerlendirilmesi farklı bir ürüne dönüştürülebilme potansiyeli seramik sektörü için önemlidir [28-30]. Ülkemizde porselen, yer ve duvar karosu, sağlık gereci ve çömlek üretimi gerçekleştiren çok sayıda firma bulunmakta ve bu firmalarda ortaya çıkan bu atıklar ciddi sorun teşkil etmektedir. Ortaya çıkan seramik atıklarının kimyasal bileşimi değişkenlik gösterse de her üç atık da %60'ın üzerinde SiO₂ ve %17'nin üzerinde Al₂O₃ içeriğine sahiptir.

Bu çalışmada; uçucu kül ile üretilen geopolimer harçlarda, SiO₂ ve Al₂O₃'ce zengin seramik karo firmasında üretim sonrası açığa çıkan havuzlarda biriken seramik kek atıklarının (Seranit Seramik, Bilecik), seramik sağlık gereci üreten fabrikada hatalı ürünlerin iskartaya ayrılması ile oluşan vitrikiye atıklarının (Turkuaz Seramik, Kayseri) ve çömlek üretimi gerçekleştiren bir fabrikadan alınan çömlek atıklarının (Anadolu Çömlekçilik, Nevşehir) geopolimerlerin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir.

2 Materyal ve metot

Çalışmada kullanılan malzemeler ve uygulanan metot aşağıda belirtilmiştir.

2.1 Materyal

Karışımlarda kullanılan F sınıfı uçucu kül (U) Adana ili Ceyhan ilçesinde bulunan Sugözü Termik Santrali'nden temin edilmiştir. Uçucu külün 45 µm elek üstü %18.1 ve özgül ağırlığı 2.32'dir (Şekil 1a). Deneysel çalışmalarda kullanılan atık seramik tozları (vitrikiye atığı, filtre-pres karo atığı, çömlek atığı) 125 mikron elekten elenerek kullanılmıştır. Filtre-pres keki (K) seramik karo fabrikası

içinde atık tesislerinden temin edilmiştir. Bu atık tesislerine farklı bölümlerden oluşan çamurlar gelmektedir. Filtre pres kekinin temin edildiği Bilecik'teki Fabrikanın su arıtma tesisinin toplam kapasitesi 10000 m³/gün üzerinde olabilmekte ve tesislerden toplamda 50 ton/gün filtre pres keki elde edilmektedir. Filtre presten sonra römorklara dökülen kekler, sanayi bölgesinin atık alanına dökülerek çok düşük miktarı (%7-10) geri üretime döndürülmekte, büyük miktarı işlevsiz şekilde bırakılmaktadır. Bu atıklardan alınıp laboratuvara getirilen malzemeler deneyde kullanıma uygun toz haline getirilmiştir (Şekil 1b). Vitrikiye atığı (V) ıskarta ürünlerin fabrikada yeniden öğütülmesi ile elde edilen toz olarak temin edilmiştir (Şekil 1c). Çömlek atıkları, Nevşehir Avanos'ta bulunan yerel bir çömlek firmasının üretim esnasında ıskartaya ayrılan ürünlerinin toz haline getirilip elenmesi ile elde edilmiştir (Şekil 1d). Atıkların kimyasal analizleri Tablo 1'de verilmiştir. Çalışmada kullanılan dere kumunun doygun kuru yüzey özgül ağırlığı 2.71 ve su emme oranı %1.81'dir [31]. Ayrıca aktivatör çözeltisi hazırlamada Nevşehir şehir şebekesine ait musluk suyu kullanılmıştır [32].



Şekil 1. a) Uçucu kül (U), b) filtre-pres karo atığı (K), c) vitrikiye atığı (V), d) pişmiş çömlek kırığı atığı (Ç)

Tablo 1. Karışımlarda kullanılan atıkların kimyasal analizleri, %

Kimyasal Kompozisyon	Ç	K	V	U
SiO ₂	52.51	68.27	63.06	55.10
Al ₂ O ₃	16.37	17.65	30.86	26.32
CaO	14.06	1.04	0.92	2.44
Fe ₂ O ₃	6.94	1.34	1.13	5.92
K ₂ O	2.76	1.35	1.06	3.44
Na ₂ O	0.80	3.27	0.27	0.52
TiO ₂	0.61	0.44	0.70	1.09
MgO	2.83	0.67	0.38	1.99
P ₂ O ₅	0.11	0.10	0.07	0.16
BaO	0.01	0.29	0.03	0.08
Mn ₃ O ₄	0.19	-	-	0.07
SO ₃	0.33	0.09	0.05	0.20
V ₂ O ₅	0.03	0.02	0.01	0.04
ZnO	0.02	0.14	0.07	-
ZrO ₂	-	0.52	0.53	0.03
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	3.20	3.86	2.04	2.08
KK	2.29	4.80	0.87	3.45
(Kızdırma kaybı)				

2.2 Metot

Geopolimerlerde kullanılan uçucu kül (U), porselen karo fabrikasından (Bilecik) temin edilen filtre-pres atık keki (K), seramik sağlık gereci fabrikasından (Kayseri) temin edilen vitrikiye atıkları (V) ve çömlek fabrikasından (Nevşehir)

alınan çömlek kırıkları atıkları (Ç) uygun tane boyutlarına getirilerek harç oluşturmak için farklı karışım oranlarında tek, ikili ve üçlü kullanılarak harçların mekanik özellikleri kıyaslanmıştır. Atık tozlar tek kullanımda 450 g, ikili kullanımda yarı yarıya 225 g, üçlü kullanımlarda ise 150 g olacak şekilde karışım tasarımı yapılarak sinerjik etkileri ortaya konmaya çalışılmıştır. Karışım tablosunda kodlamalarda atıkların karışıma girdikleri ağırlığa göre kodlamalar yapılmıştır. Örneğin 150 Ç-V-U; çömlek atığının 150 g, vitrikiye atığının 150 g ve uçucu külün de 150 g olduğu karışımı ifade etmektedir.

Karışım için hazırlanan atık tozları aktive etmek için çalışmada iki farklı aktivatör (NaOH ve Na₂SiO₃) ayrı ayrı kullanılmıştır. Tablo 2'de verilen karışımlarda NaOH ile üretim yapılırken aktivatör için 87 g NaOH ve 180 g su kullanılmıştır. Na₂SiO₃ ile yapılan üretimlerde ise 273 g Na₂SiO₃ ve 13 g su kullanılmıştır. Hazırlanan harçlarda sıvı/bağlayıcı oranı 0,40 olarak belirlenmiştir. Literatürde genel olarak aktivatörün kullanım miktarında uygun koşulların sağlandığı değer NaOH için 12 M ve Na₂SiO₃ için ise %12 Na₂O oranı olduğu için hazırlanan karışımlarda da aktivatörler bu oranda kullanılmıştır [22,33].

Karışım için hazırlanan aktivatör ve atık toz malzemeleri karıştırma kabına boşaltılmış ve mikser, ilk 30 saniyelik karıştırma işleminin ardından ikinci 30 saniye içinde kum eklenmiştir. Daha sonra 30 saniye daha yüksek hızda karıştırılmıştır. Karıştırıcı durdurulup, ilk 30 saniyede kabın kenarlarındaki harç orta kısma toplanması için toplamda 90 saniye bekletilmiştir. Bekleme süresi sonunda 60 saniye daha yüksek hızda mikser çalıştırılarak karıştırma aşaması tamamlanmıştır. Daha sonra TS-EN 196-1'e [34] uygun olarak hazırlanan karışımlar, 40×40×160 mm ebatlarındaki üç gözlü harç kalıplarına iki aşamada dökülmüştür. Üç gözlü harç kalıplarına dökülen karışımlar kalıpla birlikte etüve konularak, 24 saat boyunca 90 °C sıcaklıkta ısıl küre tabii tutulmuştur. Isıl kür uygulandıktan sonra kalıplardan çıkarılan sertleşmiş numuneler laboratuvar ortamında yaklaşık 23±2°C sıcaklıkta 7 ve 28 gün bekletilmiş ardından eğilme ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Eğilme dayanımı

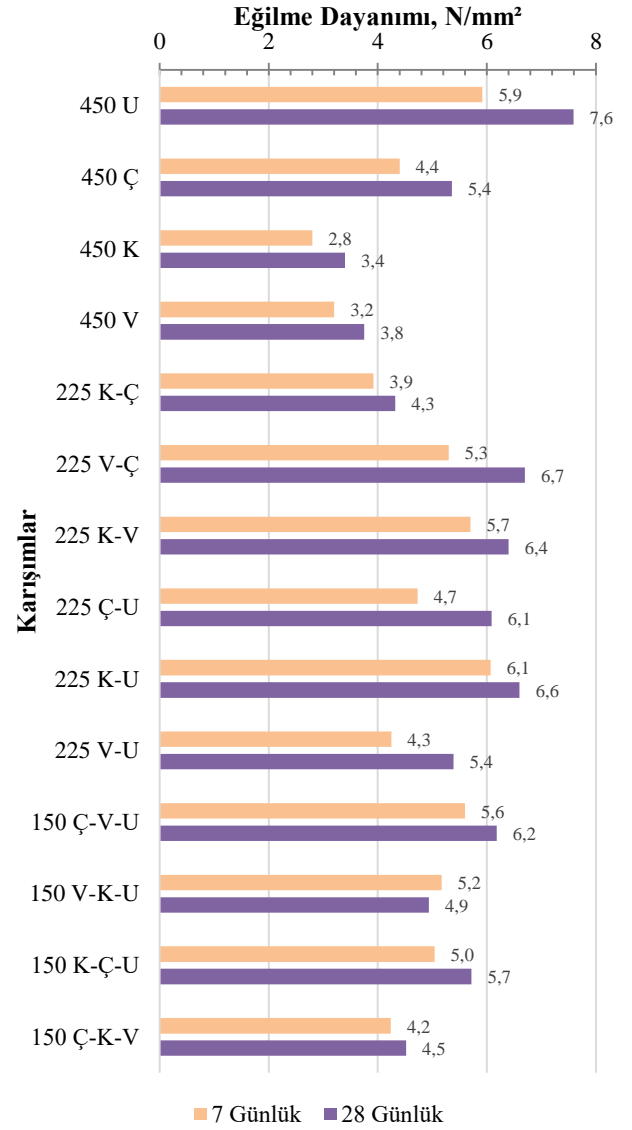
NaOH ile üretilen harçların 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları Şekil 2'de sunulmuştur. Tekli karışımlarda en yüksek 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları uçucu kül ile ve en düşük eğilme dayanımları ise filtre-pres karo atığı ile üretilen harçlarda elde edilmiştir. İkili karışımlarda ise malzemeler arasında uyum farklılıkları gözlenmiştir. Bu farklılığın nedenlerinden bazıları malzemelerin kimyasal içeriği ve tane boyutlarıdır [17, 18, 23, 33]. İkili karışımlarda genellikle tekli karışımlara kıyasla daha yüksek eğilme dayanımı elde edilmiştir. Özellikle vitrikiye- pişmiş çömlek kırığı ve vitrikiye- filtre-pres karo atığı malzemeleri arasında belirgin bir uyum gözlenmiştir. İkili karışımlarda uçucu kül içeriği ile seramik sektörü atıklarının eğilme dayanımlarında artış sağlanmıştır. Bu artış sadece uçucu külün aktivasyon kinetiğinden değil, aynı zamanda seramik sektörü atıkları ile meydana gelen sinerjik etkiden kaynaklanmaktadır [29].

Tablo 2. Alkali ile aktive edilen harçların karışım miktarları, g

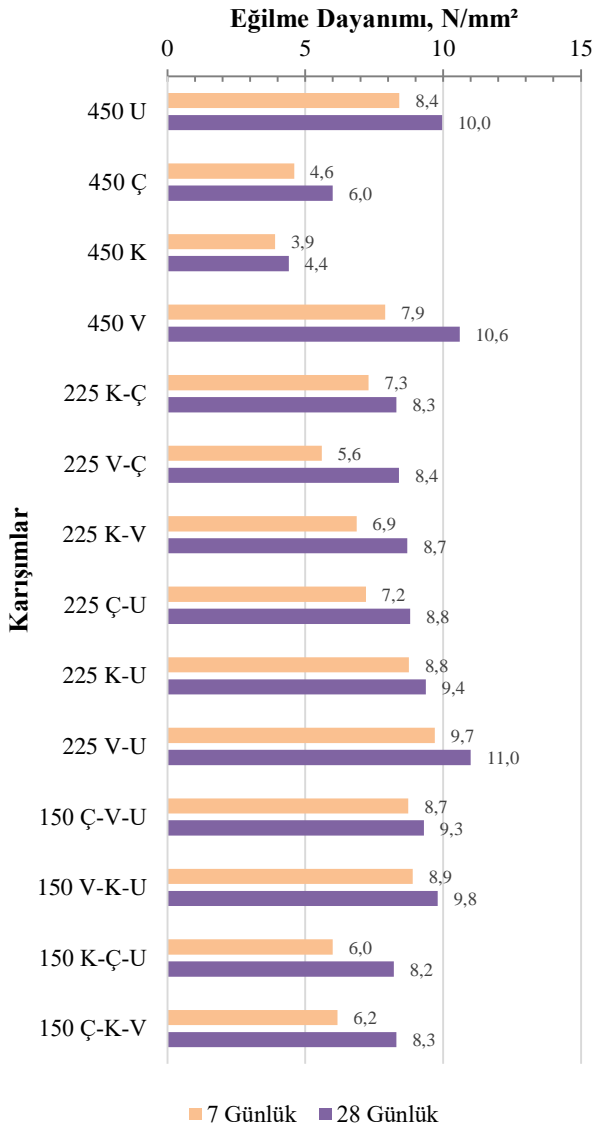
Numune Kodu	Ç	K	V	U	Kum
450 U	-	-	-	450	1250
450 Ç	450	-	-	-	1250
450 K	-	450	-	-	1250
450 V	-	-	450	-	1250
225 K-Ç	225	225	-	-	1250
225 V-Ç	225	-	225	-	1250
225 K-V	-	225	225	-	1250
225 Ç-U	225	-	-	225	1250
225 K-U	-	225	-	225	1250
225 V-U	-	-	225	225	1250
150 Ç-V-U	150	-	150	150	1250
150 V-K-U	-	150	150	150	1250
150 K-Ç-U	150	150	-	150	1250
150 Ç-K-V	150	150	150	-	1250

Malzemelerin etkin kullanımı ve en uygun kimyasal-fiziksel bileşimin elde edilebilmesi için üçlü karışımlar da üretilmiştir. Üçlü karışımları içerisinde en yüksek 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları 150 Ç-V-U kodlu harçlarda sırasıyla 5.6 MPa ve 6.2 MPa elde edilmiştir. Bununla birlikte, 150 V-K-U ve 150 K-Ç-U kodlu harçlarda 28 günlük eğilme dayanımları sırasıyla 5.2 MPa ve 5.7 MPa olarak elde edilebilmiştir.

Sodyum silikat ile üretilen geopolimer harçların eğilme dayanımları Şekil 3'te sunulmuştur. Tekli karışımlarda en yüksek 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları sırasıyla 450U ve 450V kodlu harçlarda elde edilmiştir. Bu harçların 10 MPa civarında olan 28 günlük eğilme dayanımları tekli karışım olarak üretilen diğer harçlara göre belirgin şekilde yüksektir. Tekli karışımlar içerisinde en düşük eğilme dayanımları filtre-pres karo atığı ile üretilen 450 K kodlu harçlarda elde edilmiştir. İkili karışımlarda ise en yüksek 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları 225 V-U kodlu harçlarda sırasıyla 9.7 MPa ve 11.0 MPa olarak elde edilmiştir. Uçucu kül içeren diğer ikili karışımların 28 günlük eğilme dayanımları ise 9 ± 0.4 MPa olarak elde edilmiştir. Bu yüksek eğilme dayanımı değerleri uçucu kül içeriğine bağlanabilir [8]. Ancak, karışım içeriklerinde %50 oranında seramik sektörü atıkları olduğu düşünüldüğünde, elde edilen dayanım değerleri malzemelerin birlikte geopolimer harçlarda ikili karışım halinde kullanımının verimli bir üretim metodu olabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, uçucu kül içermeyen ve sadece seramik sektörü atıklarının ikili karışımları ile üretilen harçlarda 28 günlük eğilme dayanımları 8.5 ± 0.2 MPa olarak elde edilmiştir. Sodyum silikat ile aktive edilen üçlü karışımlar arasında 150 Ç-V-U ve 150 V-K-U kodlu harçlarda 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları sırasıyla 8.8 ± 0.1 MPa ve 9.5 ± 0.3 MPa olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, kullanılan üçlü karışımların sodyum silikat ile aktivasyon ile yüksek eğilme dayanımlarına ulaşabileceğini göstermiştir. Elde edilen yüksek eğilme dayanımlarının nedeni olarak uygun kimyasal bileşim ile malzemelerden çözünen Al, Si ve Ca elementlerinin iyonik halde alkali ortamda güçlü geopolimer jel bağları kurmalarıdır [29].



Şekil 2. NaOH ile üretilen harçların eğilme dayanımları

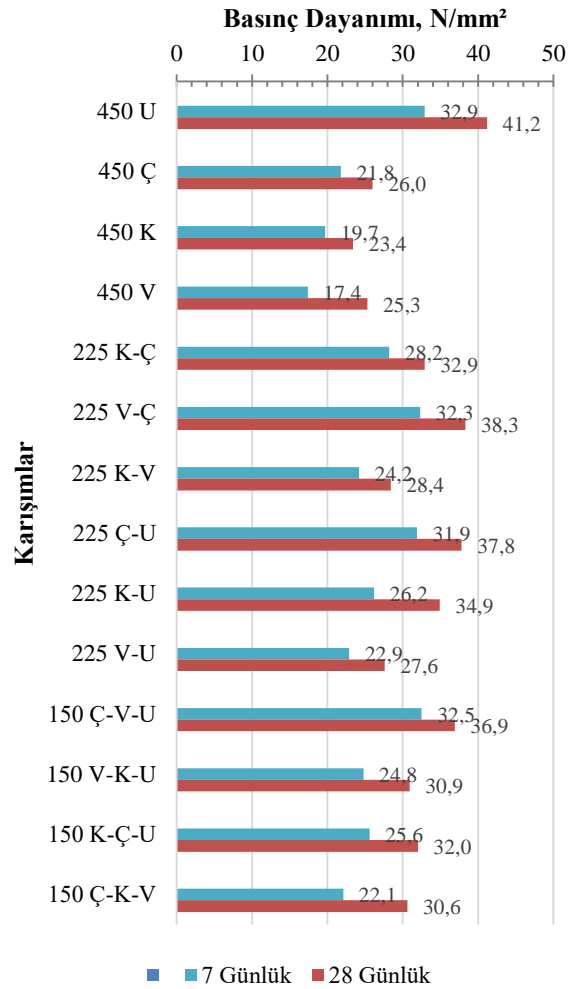


Şekil 3. Na₂SiO₃ ile üretilen harçların eğilme dayanımları

3.2 Basınç dayanımı

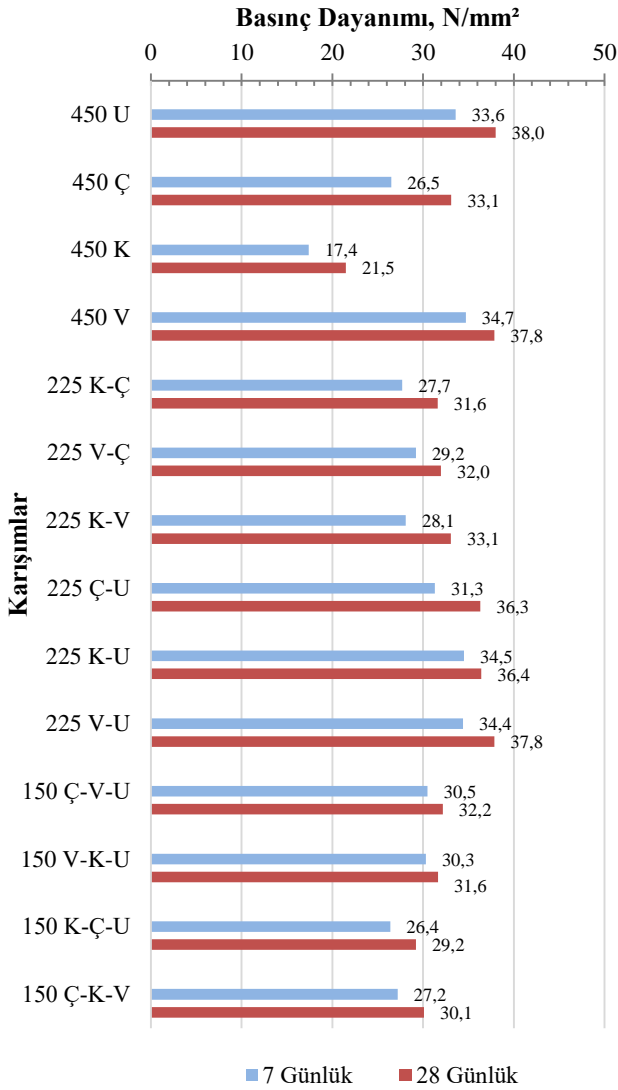
NaOH ile üretilen harçların 7 ve 28 günlük basınç dayanımları Şekil 4’de sunulmuştur. Tekli karışımlarda en yüksek basınç dayanımı değerleri uçucu kül ile üretilen harçlarda elde edilmiştir. Seramik sektörü atıklarının tekli kullanımı ile üretilen harçlarda ise 7 ve 28 günlük basınç dayanımları sırasıyla 19±2 MPa ve 24±2 MPa aralığında olmak üzere birbirlerine yakın olarak elde edilmiştir. İkili karışımlarda ise uçucu kül içermeyen karışımlar da dâhil olmak üzere tüm ikili karışımların 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri tekli karışımlara kıyasla daha yüksek elde edilmiştir. Uçucu kül içeren ikili karışımlar arasında en yüksek basınç dayanım değerlerine pişmiş çömlük kırığı- uçucu kül karışımı içeriği ile üretilen 225 Ç-U kodlu harçlarda elde edilmiştir. Uçucu kül içermeyen ikili karışımlar arasında en yüksek basınç dayanımları vitrifiye-pişmiş çömlük kırığı atıkları ile üretilen harçlarda (225 V-Ç) elde edilirken, en düşük değerler vitrifiye- filtre-pres karo atığı malzemeleri ile üretilen 225 K-V kodlu harçlarda

görülmüştür. Malzemelerin üçlü karışımı ile üretilen harçlarda en yüksek 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerlerine 150 Ç-V-U kodlu harçlarda ulaşılmıştır. Seramik sektörü atıklarının tekli üretiminden elde edilen harçların 28 günlük basınç dayanımları 24±2 MPa iken, bu malzemelerin üçlü karışımından elde edile 150 Ç-K-V kodlu harçların 28 günlük basınç dayanımı 30.2 MPa olarak elde edilmiştir. Malzemelerin birlikte kullanımı ile hem farklı tane boyutuna sahip malzemelerin mikro ölçekte doluluk meydana getirmesi açısından, hem de geopolimer bağlayıcı üretimi için uygun kimyasal içeriğin elde edilmesi yönünde etkili olmuştur.



Şekil 4. NaOH ile üretilen harçların basınç dayanımları

Sodyum silikat ile üretilen geopolimer harçların basınç dayanımları Şekil 5’de sunulmuştur. Tekli karışımlarda en yüksek 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerlerine uçucu kül ve vitrifiye atığı ile üretilen harçlarda elde edilmiştir. En düşük değerler ise filtre-pres karo atığı ile üretilen harçlarda elde edilmiştir. Sodyum silikatın aktivatör olarak kullanımının dezavantajlarından olan erken priz alma probleminin de dayanım düşüklüğüne neden olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 5. Na₂SiO₃ ile üretilen harçların basınç dayanımları

Özellikle silis içeriği yüksek olan atık tozların üçlü karışımlarında bu durum daha fazla görülebilmektedir. NaOH içeren üçlü karışımların dayanım sonuçları sodyum silikat içeren harçlara kıyasla daha yüksektir. Tablo 1'den de görüleceği gibi filtre-pres karo atığı %68 SiO₂ içeriği ile diğer toz atıklara göre en yüksek silis değerine sahiptir. Uçucu kül ile birlikte seramik sektörü atıklarının kullanıldığı ikili karışımlarda ise 37±1 MPa 28 günlük basınç dayanımı elde edilmiştir. Uçucu külün tekli kullanımından elde edilen 450 U karışımı ve uçucu kül ile birlikte seramik sektörü atıklarının kullanıldığı ikili karışımların dayanımları arasındaki farkın ±1 MPa olduğu gözlenmiştir. Bu yakın değerlere ulaşmada kullanılan seramik atığı tipi de etkili olmuştur. Önceki çalışmalarda bu çalışmadan farklı olarak yer karosu atıkları küle ikame edildiğinde dayanımlarda düşüşler gözlenmiştir. Saxena ve Gupta (2022), uçucu küle karo seramik atıkları ilave ettikleri çalışmalarında yüksek oranda seramik atığının dayanımı düşürdüğünü ifade etmektedirler [35]. Uçucu kül malzemesi geopolimer üretiminde en çok kullanılan Al₂O₃ ve SiO₂ içerikli

malzemelerin başında gelmektedir. Literatürde birçok çalışmada uçucu küllü geopolimerlerin üstün mekanik, durabilite ve çevresel özellikleri ortaya konmuştur [36, 37]. Ancak, birçok malzeme gibi uçucu küller de sonsuz temin edilebilirlikte değildir. Uçucu küllerin temin edildikleri termik santrallerin çevreye verdiği zararlar küresel anlamda kaygı oluşturmaktadır. Bu nedenle termik santral yerine güneş ve rüzgâr enerji santralleri gibi daha çevre dostu elektrik üretim tesisi yatırımları her geçen gün artmaktadır. Bu durum, ilerleyen yıllarda termik santrallere olan ihtiyacın azalacağını ve bu santrallerden ortaya çıkan uçucu külün de daha az miktarda temin edilebileceğini göstermektedir. Bu nedenle atık da olsa malzemelerin etkin ve verimli kullanımı adına uçucu küle birlikte seramik sektörü atıklarının ikili karışımlarının sodyum silikat ile aktivasyonu sonucu elde edilen geopolimerlerin sadece uçucu küle üretilen geopolimerlere göre dayanım değerleri açısından daha uygun olduğu söylenebilir. Üçlü geopolimer harç karışımlarında ise eğilme dayanımlarında olduğu gibi en yüksek basınç dayanımı değerleri de 150 Ç-V-U ve 150 V-K-U kodlu harçlarda elde edilmiştir. Bu harçların 7 ve 28 günlük basınç dayanımları sırasıyla 30,4±0,1 MPa ve 32,0±0,4 MPa olarak elde edilmiştir. Uçucu kül içermeyen 150 Ç-K-V karışımında ise 7 ve 28 günlük basınç dayanımları sırasıyla 27,2 MPa ve 30,1 MPa olarak tespit edilmiştir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada uçucu kül ve seramik sektörü atıklarının iki farklı aktivatörle aktivasyonundan elde edilen geopolimer harçların dayanım özellikleri araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular aşağıdaki gibidir.

- Seramik sektörü atıkları uçucu kül ile birlikte veya uçucu kül içermeyen geopolimer üretiminde kullanım potansiyeline sahiptir.
- Aktivatör olarak, sodyum silikatın erken priz alma probleminin özellikle silis içeriği yüksek olan atık tozların üçlü karışımlarında dayanım düşüklüğüne

neden olduğu düşünülmektedir. NaOH içeren üçlü karışımların dayanım sonuçları sodyum silikat içeren harçlara kıyasla daha yüksektir.

- Pişmiş çömlek kırığı atığı ve vitrifiye atığının tekli kullanıldığı NaOH ve Na₂SiO₃ ile aktive edilen geopolimerler harçlarda sırasıyla 25 MPa ve 30 MPa üzerinde 28 günlük basınç dayanımları elde edilebilmiştir.
- Uçucu kül ile seramik sektörü atıklarının ikili karışımları ile üretilen geopolimer harçlarda uçucu külün tek başına kullanıldığı harçlara yakın dayanım değerleri elde edilebilmiştir. Atıkların etkili ve verimli kullanımı açısından seramik atıklarının uçucu küllü geopolimerlerde kullanım potansiyeli olduğu görülmüştür.
- Seramik atıklarının ikili karışım halinde kullanıldığı geopolimer harçlarda genellikle 30 MPa üzerinde 28 günlük basınç dayanımı elde edilmiş, NaOH ile aktive edilen 225 V-Ç

karışımında da 28 günlük basınç dayanımı değeri 38.3 MPa olmuştur.

- Uçucu kül ve seramik atıklarının birlikte kullanıldığı üçlü karışımlarda da genellikle 30 MPa üzerinde 28 günlük basınç dayanımı elde edilmiştir.
- Uçucu kül içermeyen seramik atıkların üçlü kullanıldığı 150 Ç-K-V kodlu harçlarda da her iki aktivatör içeriği ile de yaklaşık 30 MPa 28 günlük basınç dayanımı elde edilebilmiştir.
- Harçların eğilme dayanımları ile basınç dayanımları arasında genellikle bir uyum olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, sodyum silikat ile üretilen harçların eğilme dayanımlarının sodyum hidroksitle üretilenlere göre genellikle daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

Bu çalışma ile seramik sektörü atıklarının hem uçucu küllü geopolimer üretiminde hem de bu atıkların ikili-üçlü karışımı ile seramik atığı esaslı geopolimer sentezinde değerlendirilebileceği görülmüştür. Ayrıca sektör atıklarının bu şekilde kullanılması çevre kirliliğinin kontrol altına alınmasına katkıda bulunacak ve sürdürülebilir yapı malzemelerini teşvik edecektir.

Teşekkür

Bu araştırma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 222M299 numaralı proje ile finanse edilmiştir. Yazarlar, TÜBİTAK'a sağladığı destek, Seranit Seramik (Bilecik), Turkuaz Seramik (Kayseri) ve Anadolu Çömlekçilik (Nevşehir) fabrikalarına atık temini desteği için teşekkür eder.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %15

Kaynaklar

- [1] Türkiye Cumhuriyeti Strateji ve Bütçe Başkanlığı, https://www.sbb.gov.tr/wpcontent/uploads/2018/10/10_SeramikCalismaGurubu.pdf, Erişim tarihi Eylül 2022.
- [2] Türkiye Seramik Federasyonu, <https://www.serfed.com/upload/ihracat->, Erişim tarihi Eylül 2022.
- [3] M. Saygı, Seramik atıkların asfalt endüstrisinde kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Uşak, 2019.
- [4] K. Kayacı, Y. Yıldırım, C. Genç, A. Keskin ve A. Çırpın, Seramik karo fabrikalarının kek ve seramik sağlık gereçleri pişmiş kırık atıklarının porselen karo bünyelerde kullanım olanaklarının araştırılması. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19 Özel Sayı (353-358), 2019.
- [5] <http://www.avanospottery.com/tr/>, Erişim tarihi Eylül 2022.
- [6] Y.H. Adıyaman, ETİBOR A.Ş. Hisarcık işletmesi atıklarının porselen karo üretiminde kullanılabilirliği. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2006.
- [7] E. Alvarez-Ayuso, Querol X., F. Plana, A. Alastuey, N. Moreno, M. Izquierdo, O. Font, T. Moreno, S. Diez, E. Vazquez and M. Barra, Environmental, physical and structural characterisation of geopolimer matrixes synthesised from coal (co-) combustion fly ashes. Journal of Hazardous Materials, 154, 175-183, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.008>
- [8] İ.İ. Atabey, F sınıfı uçucu küllü geopolimer harcının durabilite özelliklerinin araştırılması. Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, 2017.
- [9] G.F. Huseien, J. Mirza, M. Ismail, Effects of high volume ceramic binders on flexural strength of self-compacting geopolimer concrete. Adv. Sci. Lett. 24 4097-4101, 2018. <https://doi.org/10.1166/asl.2018.11549>
- [10] G.F. Huseien, A.R.M. Sam, J. Mirza, M.M. Tahir, M.A. Asaad, M. Ismail and K.W. Shah, Waste ceramic powder incorporated alkali activated mortars exposed to elevated temperatures: performance evaluation. Construction and Building Materials, 187, 307-317, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.226>
- [11] M. Keppert, E. Vejmelková, P. Bezdicka, M. Dolezelová, M. Cáčhová, L. Scheinherrová, J. Pokorný, M. Vyšvar il, P. Rovnaníková and R. Cerný, Red-clay ceramic powders as geopolimer precursors: Consideration of amorphous portion and CaO content. Appl. Clay Sci. 161 82-89, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.04.019>
- [12] S.K. Amin, S.A. El-Sherbiny, A.A.M.A. El-Magd, A. Belal, M.F. Abadir, Fabrication of geopolimer bricks using ceramic dust waste. Construction and Building Materials, 157 610-620, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.052>
- [13] S. Kulkarni, Experimental study on red mud, fly ash, GGBFS based geopolimer concrete. International journal of engineering research technology, 7(12) 107-111, 2018.
- [14] G. Mucsi, R. Szabo, A. Racz, F. Kristaly, S. Kumar, Combined utilization of red mud and mechanically activated fly ash in geopolimers. The Mining Geology-Petroleum Engineering Bulletin, 27-36, 2019. <https://doi.org/10.17794/rgn.2019.1.3>
- [15] M. Torres-Carrasco, F. Puertas, Waste glass in the geopolimer preparation. Mechanical and microstructural characterization. Journal of Cleaner Production, 90:397-408, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.074>
- [16] G.F. Huseien, A.R.M. Sam, K.W. Shah, J. Mirza and M.M. Tahir, Evaluation of alkali-activated mortars containing high volume waste ceramic powder and fly ash replacing GBFS. Construction and Building Materials, 210, 78-92, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.194>
- [17] G.F. Huseien, A.R.M. Sam, K.W. Shah and J. Mirza, Effects of ceramic tile powder waste on properties of self-compacted alkali activated concrete. Construction and Building Materials, 236, 117574, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117574>

- [18] L. Reig, L. Soriano, M.V. Borrachero, J. Monzo and J. Paya, Influence of the activator concentration and calcium hydroxide addition on the properties of alkali-activated porcelain stoneware. *Construction and Building Materials*, 68, 214-222, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.023>
- [19] A.M. Rashad and G.M.F. Essa, Effect of ceramic waste powder on alkali-activated slag pastes cured in hot weather after exposure to elevated temperature. *Cement and Concrete Composites*, 111, 103617, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103617>
- [20] L. Reig, M.V. Borrachero, J.M. Monzo, J.R.H. Savastono, M.M. Tashima, J.J. Paya, Use of ceramic sanitaryware as alternative for the development of new sustainable binders. *Key Engineering Materials*, 668, 172-180, 2015. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.668.172>
- [21] Z. Bayer Öztürk, Y.C. Yılmaz, Y. Bozkurt, İ.İ. Atabey, Vitrikiye ürün atıklarından geopolimer yapı malzemesi üretimi, The Internatinoal Conference on Materials Science, Mechanical and Automotive Engineerings and Technology in Cappadocia/TURKEY (IMSMATEC'19), 1178-1181, June 21-23, 2019.
- [22] İ.İ. Atabey, Z. Bayer Öztürk, Seramik sağlık gereci atıklarının geopolimer harç üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması. *International Journal of Engineering Research and Development*, 13(1), 212-219, 2021. <https://doi.org/10.29137/umagd.782733>
- [23] Z. Bayer Öztürk ve İ.İ. Atabey, Mechanical and microstructural characteristics of geopolymer mortars at high temperatures produced with ceramic sanitaryware waste. *Ceramics International*, 48(9), 12932-12944, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.01.166>
- [24] A.M. Rashad, A comprehensive overview about the influence of different admixtures and additives on the properties of alkali-activated fly ash. *Materials & Design*, 53, 1005-1025, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.074>
- [25] V. G. Papadakis, Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. *Cement and Concrete Research*, 30, 291-299, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00249-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00249-5)
- [26] G. Kaplan, A.B. Gültekin, Yapı sektöründe uçucu kül kullanımının çevresel ve toplumsal etkiler açısından incelenmesi, *International Sustainable Building Symposium*, 1-8, Ankara, 2010.
- [27] <https://www.dw.com/tr/avrupak%C3%B6m%C3%B%C3%BC-santralleri-kapat%C4%B1yor>
- [28] Ü. Yurt, An experimental study on fracture energy of alkali activated slag composites incorporated different fibers. *Journal of Building Engineering*, 32, 101519, 2020 <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101519>
- [29] M. Kaya, The effect of micro-SiO₂ and micro-Al₂O₃ additive on the strength properties of ceramic powder-based geopolymer pastes. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 24(1), 333-350, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01323-3>
- [30] A. Özsoy, E. Örklemmez, S. İlkentapar, Effect of addition diatomite powder on mechanical strength, elevated temperature resistance and microstructural properties of industrial waste fly ash-based geopolymer. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 25, 2338-2349, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01692-x>
- [31] TS EN 1097-6, Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler - Bölüm 6: Tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2013.
- [32] TS EN 1008, Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2003.
- [33] Z. Bayer Ozturk, R. Cırık and İ.İ. Atabey. Sustainable environment approach by the usage of ceramic pottery waste in geopolymer mortar. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-12, 2023. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04939-0>
- [34] TS EN 196-1, Çimento Dency Metodları – Bölüm 1: Dayanım Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2009.
- [35] R. Saxena, T Gupta, Assessment of mechanical, durability and microstructural properties of geopolymer concrete containing ceramic tile waste. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 24(2), 725-742, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10163-022-01353-5>
- [36] İ. İ. Atabey, O. Karahan, C. Bilim, C. D. Atış, The influence of activator type and quantity on the transport properties of class F fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials*, 264, 120268, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120268>
- [37] I. Luhar, S. Luhar, A comprehensive review on fly ash-based geopolymer. *Journal of Composites Science*, 6(8), 219, 2022. <https://doi.org/10.3390/jcs6080219>





Doğrusal olmayan EEG dinamikleri ile anksiyete tespiti

Detection of anxiety with non-linear EEG dynamics

Elif Uğurgöl¹, Turgay Batbat^{2,*}, Demet Yeşilbaş³, Miray Altınkaynak⁴, Ayşegül Güven⁵,
Esra Demirci⁶, Nazan Dolu⁷

^{1,3} Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri Türkiye

^{2,4,5} Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Kayseri Türkiye

⁵ Erciyes Üniversitesi Klinik Mühendislik Araştırma ve Uygulama Merkezi (ERKAM), Kayseri Türkiye

⁶ Erciyes Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Çocuk ve Ergen Ruh Sağlığı ve Hastalıkları Anabilim Dalı, Kayseri Türkiye

⁷ İstanbul Medipol Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Fizyoloji Anabilim Dalı, İstanbul Türkiye

Özet

Anksiyete, toplum içerisinde sıklıkla rastlanılan ve aşırı kaygı ile karakterize edilen psikiyatrik bir bozukluktur. Mevcut subjektif yöntemler düşünüldüğünde bu bozukluğun kantitatif yöntemlerle tespiti önem kazanmaktadır. Bu amaçla yapılan çalışmada 4'lü likert tipli Beck Anksiyete Ölçeği kullanılıp gerekli klinik değerlendirmeler yapılmıştır. Değerlendirme sonucunda anksiyete bozukluğu bulunan grup ve kontrol grubu şeklinde iki katılımcı grubu belirlenmiştir. Katılımcılardan dinlenme durumunda Elektroensefalografi (EEG) kayıtları alınmış daha sonra EEG sinyallerinden entropi ve Hjorth (karmaşıklık, hareketlilik) parametreleri hesaplanmıştır. Hesaplanan öznetelikler makine öğrenmesinde K -En Yakın Komşu (K-Nearest Neighbor, kNN), Çok Katmanlı Algılayıcı (Multi-Layer Perceptron, MLP) ve Rastgele Orman (Random Forest, RF) sınıflandırma algoritmalarıyla sınıflandırılmışlardır. Bu sınıflandırıcılardan en başarılı sonuç veren model olan kNN %88.4 değerine kadar ulaşabilmiştir. Ayrıca farklı parametrelerin bir arada kullanımının başarı oranında 3 algoritma için yükselişe sebep olduğu gözlenmiştir. Bu sonuçlar makineli öğrenme tekniklerinin anksiyetenin tanı süreçlerinde kullanımına uygun olduğunu gösteren çalışmaları desteklemektedir.

Anahtar kelimeler: EEG, Anksiyete bozukluğu, Dinlenme durumu, Makineli öğrenme

1 Giriş

2013'te Amerikan Psikiyatri Birliği (APA) tarafından yayınlanan Mental Bozuklukların Teşhis ve İstatistik El Kitabı'nda anksiyete, aşırı korku ve endişe ile ilgili davranış bozukluklarını kapsayan ruhsal bir bozukluk olarak ele alınmıştır [1]. Bu bozukluğun en yaygın psikiyatrik bozukluklardan biri olduğu düşünülmekte ve yüksek hastalık yükü ile ilişkilendirilmektedir [2]. Dünya Sağlık Örgütü verilerine göre 2019 yılında dünya genelinde 301 milyon insanda anksiyete bozukluğu görülmüştür [3]. Anksiyetenin erken yaşlarda ortaya çıkması ve yüksek insidansa sahip olması, bu konudaki çalışmaların önemini göstermektedir [4].

Abstract

Anxiety is a psychiatric disorder characterized by excessive worry frequently encountered within society. Given the prevalence of anxiety and the limitations of current subjective assessment methods, the quantitative determination of this disorder gains significance. In pursuit of this objective, the study employed the 4-point likert-type Beck Anxiety Scale alongside essential clinical evaluations. As a result of the assessment, two participant groups were formed: one consisting of individuals with anxiety disorder and the other serving as the control group. Electroencephalography (EEG) recordings were obtained from the participants during resting states, followed by the computation of entropy and Hjorth (mobility, complexity) parameters from the EEG signals. The computed features were then classified using machine learning algorithms, namely K-Nearest Neighbor (kNN), Multi-Layer Perceptron (MLP), and Random Forest (RF), for classification purposes. The k-Nearest Neighbor (kNN) model, which yielded the most successful outcome among these classifiers, was able to reach an accuracy level of 88.4%. Furthermore, the combined utilization of diverse parameters was observed to lead to an increase in the success rate across all three algorithms.

Keywords: EEG, Anxiety disorder, Resting state, Machine learning

Günümüzde anksiyete gibi psikiyatrik bozukluklarda psikopatolojik tanı için kullanılan klinik parametreler hem değişken hem de öznel olduğu için nesnel yaklaşımlarla elde edilen biyobelirteçler son yıllarda önem kazanmıştır. Beyin görüntülemeye tanı amaçlı kullanılan mevcut teknolojiler fMRI (Fonksiyonel Manyetik Rezonans Görüntüleme), Pozitron Emisyon Tomografi (PET) gibi maliyetli yöntemleri kapsamaktadır. Bu yöntemlerin yanı sıra beyindeki zamana bağlı değişimi ve biyoelektriksel aktiviteyi görmede kullanılan Elektroensefalografi (EEG), düşük maliyetli ve etkili bir altın standarttır. Girişimsel olmayan bir elektrofizyolojik sinyal ölçüm tekniği olması, kolay ve güvenilir bir mekanizma ile beyindeki patolojileri anlamak için kullanılmasına imkân sağlar. Nörolojik

hastalıkların teşhisinde kullanılmasına aşına olduğumuz EEG psikolojik bozukluklar için de biyobelirteçler sağlamaktadır [5–8]. Birey dinlenim halindeyken beyni hem fizyolojik hem de psikolojik olarak dinamiktir [9,10]. Bu nedenle, zamana bağlı beyin dinamiğinin gösterim biçimi olarak etkin şekilde kullanılan EEG dinlenim halinde de beyin karakteristiğine dair bilgi sağlamaktadır [11]. Bu durum dinlenim kayıtlarında psikopatolojik durumların belirlenmesi yönündeki kullanımını son yıllarda arttırmıştır [12,13].

Bu çalışmada, düzensizliğin bir göstergesi olarak tanımlanan parametre olan entropi ve istatistiksel tabanlı matematiksel altyapıya sahip özelliklerden Hjorth parametreleri gibi doğrusal olmayan öznitelikler ele alınmıştır. Entropi, hastalıkların sağlıklılardan ayrıldığı çalışmalarda sık kullanılan önemli bir özelliktir [14,15]. Hjorth parametrelerinin (aktiflik, hareketlilik, karmaşıklık) nörolojik ve psikiyatrik çalışmalarda kullanımı son yıllarda artmaktadır [16–18]. Anksiyete özelinde EEG ile yapılan çalışmaların çoğu doğrusal parametrelerin analizine dayalı olsa da beyindeki karmaşık elektriksel aktivitelerin düzensiz ve doğrusal olmadığı bilinmektedir [19]. Birçok çalışma kaotik yapısı sebebiyle EEG'nin doğrusal olmayan parametrelerinin uygulanabilirliğini doğrulamıştır [20–25].

EEG sinyallerinden hesaplanan öznitelikler, istatistiksel yöntemler ve makine öğrenmesi algoritmalarıyla sıklıkla değerlendirilmektedir. Makine öğrenmesi metotlarının tanı süreçlerine nesnel yaklaşım sunmakta olduğu görülmektedir. Sınıflandırma başarı oranları veri türüne veya sınıflandırıcının matematiksel altyapısına göre değişebilmektedir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde görev tabanlı veya dinlenim halindeki EEG kayıtlarından çıkarılan farklı parametrelerin makinelere öğrenme yöntemleri ile değerlendirildiğinde birçok psikiyatrik bozukluğun yüksek başarımlarla tespit edilebildiği görülmektedir [26,27]. Örneğin dinlenim durumu EEG'sinden hesaplanan istatistiksel temelli parametreler ve Hjorth parametrelerinin kullanılarak depresyonun incelendiği bir çalışmada farklı sınıflandırıcılar içerisinde en yüksek başarı oranı K-En Yakın Komşu (K-Nearest Neighbor, kNN) Algoritmasıyla elde edilmiştir [28].

Bu çalışma literatürde EEG'nin doğrusal olmayan özniteliklerinin bir arada kullanılarak makine öğrenmesi metotlarıyla anksiyeteli kişilerin verilerini tespit etmeyi hedefleyen çalışmalardan biri olacaktır. Prospektif şekilde gerçekleştirilen bu çalışmada anksiyetenin sebep olduğu anormal nöral mekanizmaların tespit edilip tanı süreçlerinin kantitatif yöntemlerle desteklenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda EEG segmentlerine ait öznitelikler hesaplatılmış ve farklı makine öğrenmesi algoritmaları ile verilere sınıflandırma çalışması yapılmıştır.

2 Materyal ve metot

2.1 Katılımcılar

Katılımcılar 18-23 (21.2 ort 1.6 standart sapma) yaş grubundaki 22 anksiyeteli (anksiyete haricinde bir psikiyatrik/nörolojik rahatsızlığı bulunmayan) ve yine 18-23 (20.95 ort 1.7 standart sapma) yaş grubundaki 21 sağlıklı erkek üniversite öğrencisi olarak belirlenmiştir. Çalışma için

gerekli etik izinler Helsinki Kriterlerine uygun olacak şekilde Erciyes Üniversitesi Klinik Araştırmalar Etik Kurulu tarafından 2022/312 numaralı karar ile onaylanmıştır.

Tüm katılımcılar Beck Anksiyete Ölçeği ve Beck Depresyon Ölçeği'nin Türkçe versiyonlarına tabi tutulmuş [29,30], klinik özellikleri ölçülmüştür. Katılımcıların psikiyatri uzmanı tarafından değerlendirilmeleri yapıldıktan sonra anksiyete şiddetine göre gruplandırılmışlardır. Beck Anksiyete Ölçeği'nin Türkçe versiyonu psikiyatride geçerli ve güvenilir bir metottur [31]. 0-3 arasında 4'lü likert tipine göre değerlendirmeye elde edilen toplam puan, 8'in altında sağlıklı, 8 ile 15 arasında hafif anksiyete, 16 ile 25 arasında orta derecede anksiyete ve 26 ile 63 arasında ise şiddetli anksiyete olarak değerlendirilir. Beck Anksiyete Ölçeği el kitabına göre, klinik olarak anlamlı anksiyete için önerilen kesme puanı 16'dır [32, 33]. Çalışmada 16 puan eşliğinin altında puan alan katılımcılar sağlıklı gruba dahil edilmiş ve bu grubun puan ortalamasının 3.76 (std 2.34) olduğu görülmüştür. 16 puanın üzerinde anksiyete şiddetine sahip katılımcılardan oluşan anksiyeteli grubun ise ortalama 25.09 (std 7.04) puana sahip olduğu görülmüştür. Katılımcıların demografik/klinik özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Katılımcıların demografik/klinik özellikleri

	Kişi Sayısı	Yaş	Beck Anksiyete
Kontrol Grubu	21	20.95 ± 1.7	3.76 ± 2.34
Anksiyeteli Grup	22	21.2 ± 1.6	25.09 ± 7.04

2.2 Prosedür

Katılımcılara gerekli bilgilendirmeler yapıldıktan sonra bilgilendirilmiş gönüllü olur formları imzalatılmıştır. Anksiyetenin durumuna göre grupların belirlenmesinden sonra denekler Faraday kafesli karanlık odada dik pozisyonda koltuğa oturtulmuş ve kendilerinden dinlenim pozisyonunda kalmaları istenmiştir. Yalnızca kayıtları alan araştırmacıların ve denegin bulunduğu deney ortamında katılımcıların ilk 4 dakika gözler açık, sonra 2 dakika gözler kapalı olmak suretiyle toplam 6 dakika süren EEG kayıtları alınmıştır. Katılımcılardan kayıt sürecinde olabildiğince hareketsiz kalmaları ve zihinlerini rahat bırakmaları istenmiştir. Gözler açık durumdayken göz hareketleri ve göz kırpmaya nedeniyle EEG sinyali daha gürültülü olabildiğinden ayrıca sinyalin baseline durumu düşünülerek 4 dk'lık kayıt alınmış, bu kaydın son 2 dakikası değerlendirmeye katılmıştır. Bu süreler belirlenirken anksiyete dinlenim durumu yayınları baz alınarak 2 dk gözler açık, 2 dk gözler kapalı durum ele alınmıştır [34]. Yapılan analizlerde anksiyeteli bireyler ve kontrol grubu arasında anlamlı farklılık gösteren gözlerin kapalı olduğu 2 dakikalık süreç esas alınarak çalışma sürdürülmüştür.

2.3 EEG kaydı

Katılımcıların EEG kaydı Erciyes Üniversitesi Klinik Mühendisliği Araştırma ve Uygulama Merkezinde bulunan ışık, ses ve elektromanyetik alan izolasyonlu Faraday Kafesli elektrofizyolojik işaret kayıt odasına alınmıştır. Uluslararası 10-20 standardına göre tasarlanan EEG kipi ve EB Neuro

firmasının BE-Light 36 EEG cihazı kullanılarak 17 kanaldan (F7, F3, Fz, F4, F8, T3, C3, Cz, C4, T4, T5, P3, Pz, P4, T6, O1 ve O2) EEG kaydı alınmıştır. Sistemin toprak bağlantısı sağ mastoid, referans kanalı ise sol kulak memesi olarak belirlenmiştir. Elektrot dirençleri 5 kΩ değerinin altında tutulmuştur. Veriler saniyede 512 örnekleme frekansı ile kaydedilmiştir. Şekil 1’de gözlerin kapalı olduğu sürece ait 20 saniyelik örnek sinyal çizimi verilmiştir. Siyah renkteki sinyal kontrol grubunda bulunan bir katılımcıya, kırmızı renkteki sinyal ise anksiyete tespit edilen grupta bulunan bir katılımcıya aittir.

2.4 EEG veri işleme

Kayıtlardan elde edilen EEG sinyalleri Matlab R2021b programı ile işlenmiştir. EEG sinyallerine 0.5-35 Hz aralığında bant geçiren filtre uygulanmıştır. 2 dakikalık gözler kapalı ve 2 dakikalık gözler açık kaydın nispeten daha gürültüsüz olan orta bölümünden (35-55 s ve 65-85 s aralığı) 20 s’lik segmentler alınmıştır. Böylece her katılımcıya ait 2 adet segment oluşturulup bu segmentler üzerinden çalışma sürdürülmüştür [35]. Bu işlem 17 kanalın tümü için gerçekleştirilmiştir. Ardından tüm segmentlere ait zaman domeninde entropi, karmaşıklık, hareketlilik özellikleri hesaplanmıştır.

2.4.1 Entropi

Belirsizliğin bir ölçütü olarak bilinen entropinin EEG için bir öznitelik olarak kullanımına literatürde sıkça rastlanmaktadır [36]. Bu çalışmada kullanılan entropinin Shannon modeli Denklem (1)’de görüldüğü üzere olasılık temelli bir denkleme dayanmaktadır [37, 38].

$$E(n) = - \sum_{i=0}^{N-1} P_i^2 [n] \log_2(P_i^2 [n]) \quad (1)$$

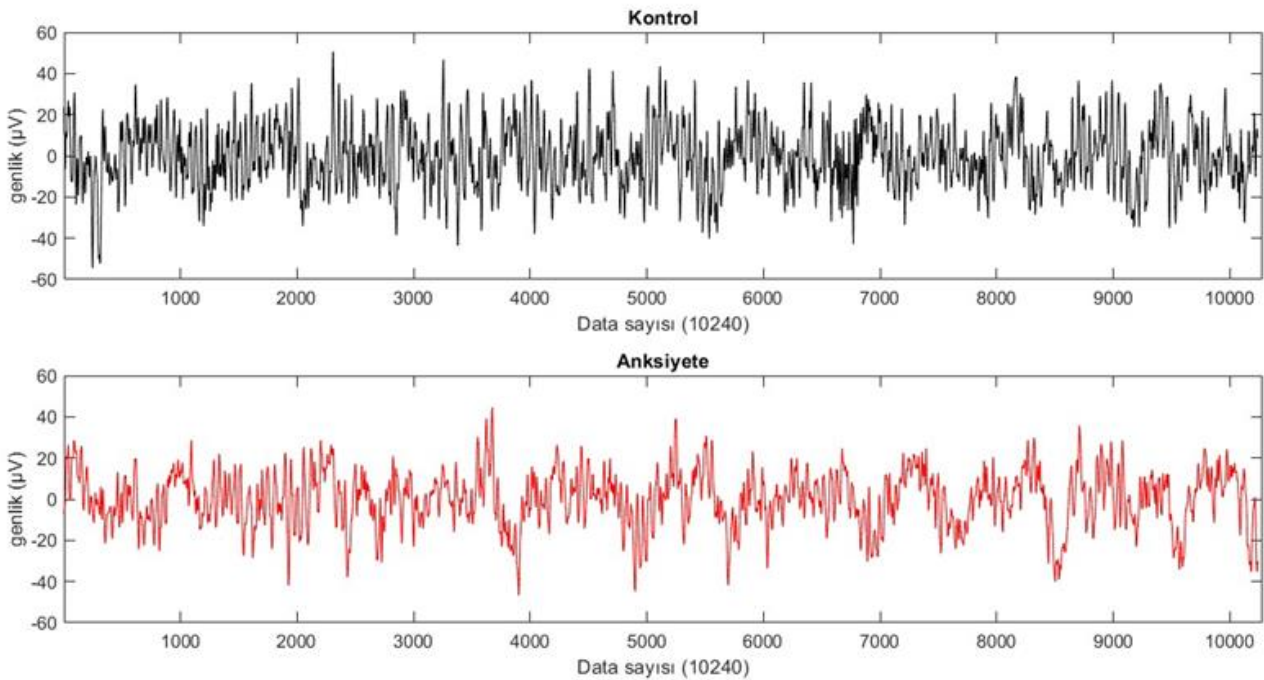
2.4.2 Hjorth parametreleri

Hjorth parametreleri EEG sinyallerine ait özellikleri tanımlamada kullanılan doğrusal olmayan bir öznitelik grubudur [39]. İstatistiksel temelli bir yaklaşımla hesaplanan Hjorth parametrelerinden Denklem (2)’de görülen hareketlilik, verideki eğimlere ait bir ölçütken Denklem (3)’te görülen karmaşıklık ise verideki eğim sayısını ifade eder [17, 38, 40]. Anlamsal bakıldığında hareketlilik sinyalin ortalama frekansına ait bir bilgi iken karmaşıklık frekanstaki değişimin yaklaşık olarak hesaplanmasına dayanır [41].

$$\text{Hareketlilik (H)} = \sqrt{\frac{\text{var}\left(\frac{x(n)dx}{dn}\right)}{\text{var}(x(n))}} \quad (2)$$

$$\text{Karmaşıklık (K)} = \frac{H(x(n))dx}{H(x(n))} \quad (3)$$

Elde edilen bu özellikler anksiyete gruplandırması esas alınarak karakterize edilip veri sınıfları oluşturulduktan sonra Waikato Environment for Knowledge Analysis (WEKA Software 2022) programında fizyolojik parametrelerde başarılı sonuçlar veren kNN, Çok Katmanlı Algılayıcı (Multi-Layer Perceptron, MLP) ve Rastgele Orman (Random Forest, RF) sınıflandırma algoritmalarına tabi tutulmuşlardır.



Şekil 1. Gözlerin kapalı olduğu sürece ait 20 saniyelik EEG segmentlerinin örnek çizimi

2.5 Sınıflandırma

2.5.1 K-en yakın komşu algoritması

Sınıflandırma ve regresyon yapmaya imkân sağlayan bu algoritma parametrik olmayan temel bir denetimli makine öğrenmesi metodudur. Bu algoritma, test veri noktasına en yakın olan k komşu veri noktalarının etiketlerine dayanan bir karar süreci izler. kNN algoritması, eğitim veri seti üzerinde çalışır. Her bir veri noktası, özellik değerleri ve ilgili sınıf etiketiyle birlikte temsil edilir. Sınıflandırma durumunda, bir test veri noktasının sınıfını tahmin etmek için, kNN algoritması öncelikle en yakın k veri noktasını belirler. Bu çalışmada kullanılan k değeri 1 olarak belirlenmiştir [42]. Bu belirleme sürecinde, genellikle bu çalışmada da kullanılan Öklid mesafesi veya başka bir mesafe metriği kullanılabilir. Daha sonra, en yakın k veri noktasının sınıf etiketleri dikkate alınarak, çoğunluk oylaması yöntemiyle test veri noktasının sınıfı tahmin edilir [43]. Bu algoritma EEG sinyallerinin özneliklerini sınıflandırmak için kullanılabilir [36, 44, 45].

2.5.2 Çok katmanlı algılayıcı

Yapay Sinir Ağlarındaki perceptronlar, doğrusal olarak sınıflandırma zorluklarını aşmakta başarısız olabilmektedir. Özellikle lineer olmayan problemlerdeki zorlukları çözebilmek adına yapılan araştırmalar, MLP modelinin geliştirilmesine yol açmıştır. MLP, tam bağlantılı bir yapay sinir ağı modeli olarak karşımıza çıkmakta ve denetimsiz bir şekilde işlev görmektedir. Giriş verileri, özel ağırlıklarla çarpılarak aktivasyon fonksiyonları kullanılarak gizli katmanlardan çıktılar üretir. Son katmanda ise hedeflenen sonuçlar elde edilir.

MLP, geri yayılım algoritması yardımıyla eğitilerek non-lineer ilişkileri öğrenebilme yeteneğine sahiptir. Ayrıca, geniş bir makine öğrenimi uygulama yelpazesi içerisinde de etkili bir şekilde kullanılabilir [46]. MLP, EEG çalışmalarında umut verici sonuçlar veren bir algoritma olarak görülmektedir [47].

2.5.3 Rastgele orman

Birçok karar ağacının bir araya gelerek oluşturduğu topluluk tipinde bir makine öğrenme modelidir [48,49]. Denetimli olarak çalışan Rastgele Orman algoritmasında her bir karar ağacı, veri setinin rastgele örneklemelerini kullanarak eğitilir. Bu rastgele örnekleme süreci, veri setinin bir alt kümesini oluşturarak yapılır. Ayrıca, her bir ağaç için düğüm bölünmesi sırasında rastgele özelliklerin bir alt kümesi kullanılır. Sınıflandırmada en çok oy alan ağaçlar kullanılarak ezberleme etkisinden uzak bir sınıflandırma işlemi gerçekleştirilir. Bu modelin EEG ile nörolojik patolojilerin görülmesinde doğru bir sınıflandırıcı olabileceğini gösteren çalışmalara sıklıkla rastlanmaktadır [50-53].

Çalışmada tüm kanallardan elde edilen entropi ve Hjorth parametreleri, anksiyeteli olan ve anksiyeteli olmayan grup şeklinde kategorize edilerek bu algoritmalara tabi tutulmuşlardır. Algoritmaların başarısı doğruluk, kesinlik, duyarlılık, F-ölçütü, ROC alanı ve PRC (Precision-Recall

Curve Area, Kesinlik-Duyarlılık Eğrisi Alanı) sınıflandırma ölçütleri ile değerlendirilmiştir.

Doğru pozitif oranı (TP: true positive), doğru negatif oranı (TN: true negative), yanlış negatif oranı (FN: false negative) ve yanlış pozitif oranı (FP: false positive) ile oluşan karmaşıklık matrisi modelin başarısının değerlendirildiği yapıdır. Karmaşıklık matrisi bileşenlerinden elde edilen en temel ölçütlerden biri olan doğruluk, başarının anlaşılması ve yorumlanmasını sağlar (Denklem (4)). Bu değer 0 ve 1 aralığında olur ve 1'e yakın olması modelin başarılı olmasıyla ilişkilendirilir.

$$\text{Doğruluk} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FN + FP} \quad (4)$$

Makine öğrenmesi ve istatistikte kullanılan bir ölçüt olan kesinlik ise algoritmanın pozitif olarak tahmin ettiği örneklerin gerçekte ne kadar pozitif olduğunu gösterir (Denklem (5)). Bu ölçüt bir modeli değerlendirmek için tek başına yeterli olmadığı için duyarlılık ve F-ölçütü gibi ölçütlere de bakılmalıdır.

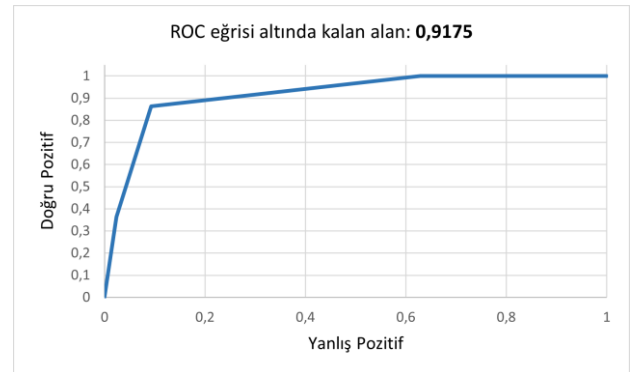
$$\text{Kesinlik} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (5)$$

Duyarlılık gerçek pozitif örneklerin ne kadarının tespit edildiğini bulmaya yönelik çalışır (Denklem (6)).

$$\text{Duyarlılık} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (6)$$

Kesinlik ve duyarlılık ölçütleri birbirine zıt olacak şekilde çalışır. Bu noktada iki ölçütü birleştirip genel bir değerlendirme sonucu sağlayan F-ölçütü devreye girer. Denklem (7)'de görüldüğü üzere F-ölçütü, kesinlik ve duyarlılık ölçütlerinin harmonik ortalaması alınarak hesaplanır ve doğruluğun bir ölçüsü olarak kabul edilir [54, 55].

$$F \text{ Skoru} = \frac{2 \times \text{Kesinlik} \times \text{Duyarlılık}}{\text{Kesinlik} + \text{Duyarlılık}} \quad (6)$$



Şekil 2. Entropi ve Hjorth parametrelerinin bir arada kNN sınıflandırıcısına verilmesi sonucu elde edilen ROC eğrisi grafiği.

Değerlendirme yapılan bir diğer ölçüt olan ROC alanı, ikili sınıflandırmalarda ortaya çıkan işlem karakteristik eğrisinin altında kalan toplam alanı ifade eder. PRC Alanı modelin yeteneklerini tanımlayan bir sayısal değerdir. Bir modelde yüksek kesinlik ve yüksek duyarlılığın tercih edilmesi sebebiyle bu iki ölçütten hesaplanan PRC grafiklerinin ROC grafiklerinden daha bilgilendirici olabileceği öne sürülmüştür [55, 56]. Örnek bir ROC eğrisi Şekil 2'e görülmektedir.

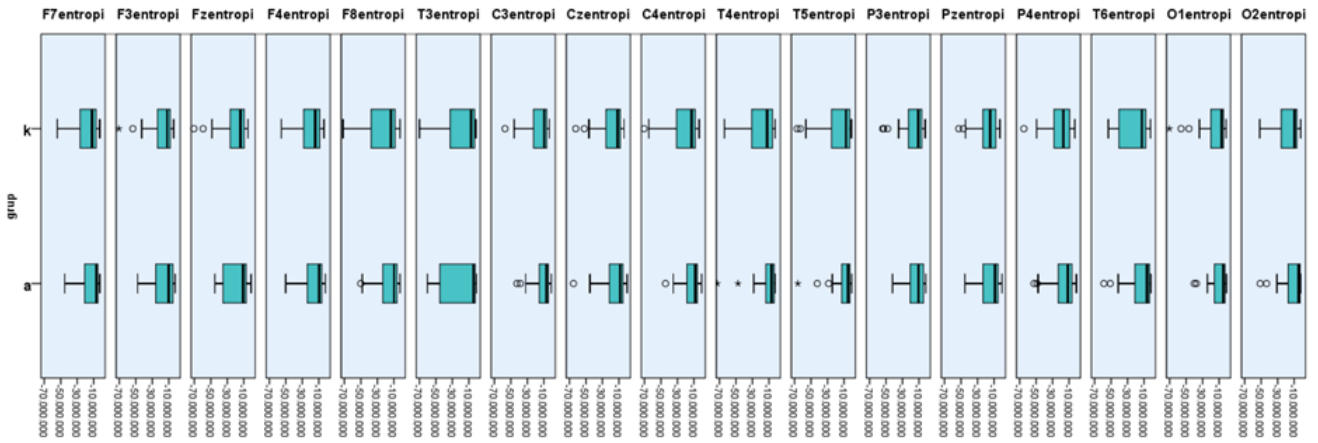
3 Bulgular

Bu çalışmanın amacı anksiyete bozukluklarının tanı süreçlerini kantitatif yaklaşımlarla desteklemektir. Bu bağlamda biyobelirteçler kullanılmış olup makine öğrenmesi metotlarıyla anksiyete bozukluğu bulunan öğrencilerin ve kontrol grubu öğrencilerinin verilerine yönelik sınıflandırma uygulamaları yapılmıştır. Ele alınan öznelikler için sınıflara göre grafikler aşağıda verilmiştir. Entropi Şekil 3'te, Hjorth hareketlilik Şekil 4'te, Hjorth karmaşıklık Şekil 5'te verilmiştir. Kontrol grubu "k", Anksiyeteli grup "a" ile belirtilmiştir. Şekil 3'te bulunan grafiklere bakıldığında tüm kanallar için entropi ortalamalarının, anksiyeteli grupta

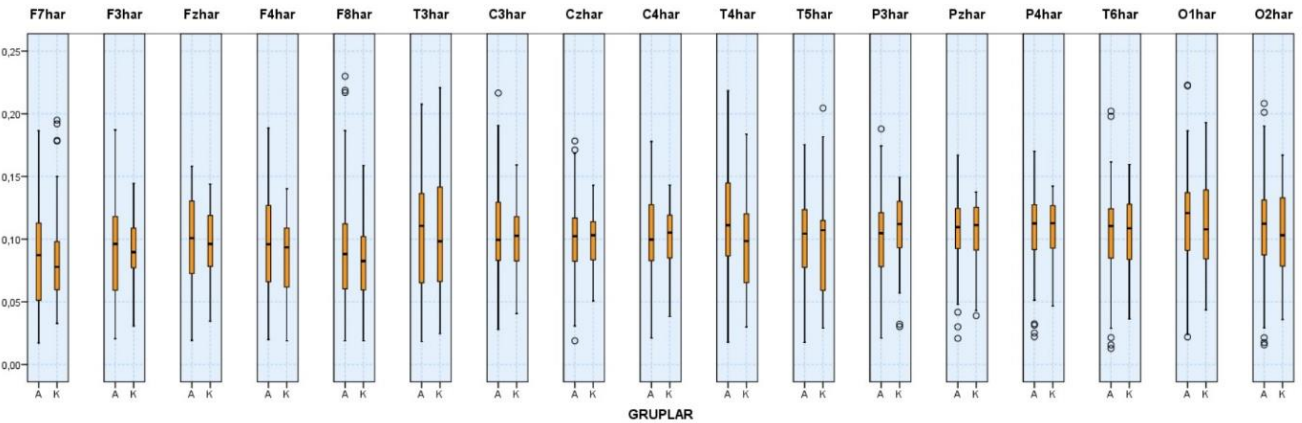
kontrol grubuna göre daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 4'te bulunan hareketlilik değerleri incelendiğinde C3, C4, CZ, P3, PZ ve T3 kanallarında kontrol grubu değerleri ortalama bakımından daha yüksek iken diğer 11 kanalda anksiyeteli grubun değerleri kontrolden daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 5'teki karmaşıklık değerleri ise FZ ve T6 kanallarında kontrol grubunda anksiyeteli gruptan daha yüksek olarak hesaplanmışken diğer 15 kanala bakıldığında anksiyeteli grupta kontrole göre daha yüksek bir ortalama ile sonuçlanmıştır. İki gruptan dörder katılımcı için örnek parametre hesaplama sonuçları Tablo 2'de görülmektedir.

3.1 Klinik bilgi analizi

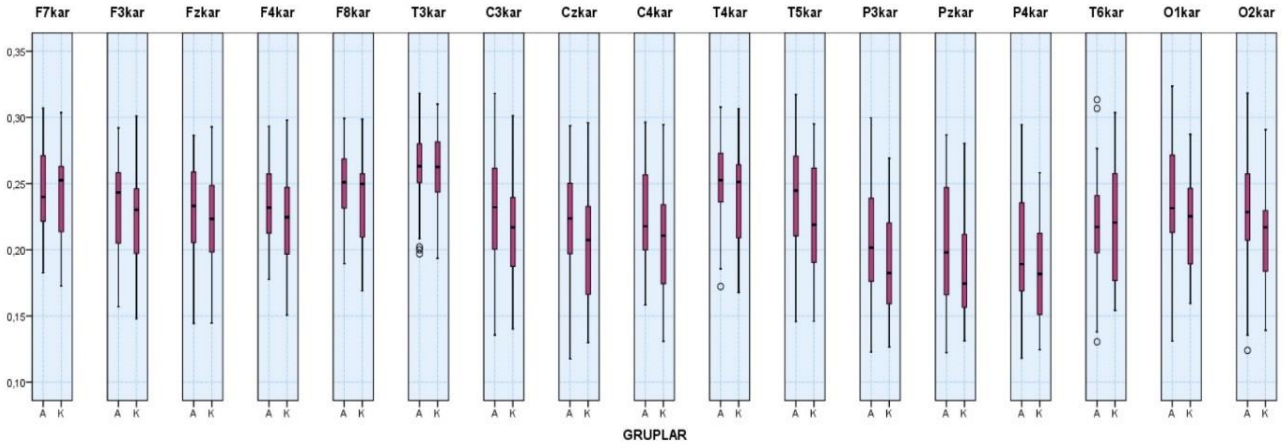
Katılımcıların anksiyeteyle ilgili durumuna göre belirlenen grupların Beck Depresyon Ölçeği puan skorları elde edilmiştir. Bu puanlar bağımsız değişken t-testi ile karşılaştırılmıştır. Anksiyeteli grup ile kontrol grubu arasında yapılan t-testinin ortaya çıkardığı yüksek anlamlılık, literatürdeki depresyon ve anksiyete bozukluğunun komorbid olma durumunu destekler niteliktedir.



Şekil 3. Kullanılan 17 EEG kanalının Shannon Entropi değerlerinin grafikleri (a: Anksiyeteli grup, k: Kontrol grubu)



Şekil 4. Kullanılan 17 EEG kanalının hareketlilik değerlerinin grafikleri (A: Anksiyeteli grup, K: Kontrol grubu)



Şekil 5. Kullanılan 17 EEG kanalının karmaşıklık değerlerinin grafikleri (A: Anksiyeteli grup, K: Kontrol grup)

3.2 Sınıflandırma

Çalışma, literatürde benzer problemlere yönelik sınıflandırma çalışmalarında yaygın olarak kullanılan algoritmalarından kNN, MLP ve RF kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yalnızca entropi değerleri kullanılarak yapılan ikili sınıflandırma işlemleri neticesinde sınıflandırıcılardan elde edilen sonuçlara bakıldığında kNN algoritmasının entropi verilerini ayırmada %70.9 ile diğer sınıflandırıcılardan yüksek bir başarı elde etmiş olduğu görülmektedir (Tablo 3). Karmaşıklık için gerçekleştirilen

sınıflandırmalarda 3 algoritmadan en yüksek başarı oranı olan %86 değeri, kNN sınıflandırıcısı ile sağlanmıştır. kNN, hareketlilik parametresi için de %82.6 ile en yüksek başarı sonucunu vermiştir. Diğer sınıflandırıcılardan MLP, karmaşıklık ve hareketlilik parametrelerinin sınıflandırılmasında RF'den daha yüksek başarıyla sonuçlanmışken entropi değerlerinin sınıflandırılmasında RF'den daha düşük bir başarı getirmiştir. Ayrıca tüm parametrelerin bir arada sınıflandırıcılara verilmesi 3 algoritma için de başarı sonucunun artmasına neden olmuştur.

Tablo 2. Çalışmaya katılan 4 anksiyeteli ve 4 sağlıklı kişinin FZ kanalına ait örnek parametre değerleri

FZ Kanalı	Katılımcı	Parametreler		
		Entropi	Karmaşıklık	Hareketlilik
Kontrol Grubu	Katılımcı 3	-1.048E+07	0.2689	0.0674
	Katılımcı 6	-1.334E+07	0.2003	0.1348
	Katılımcı 7	-1.577E+07	0.1444	0.0968
	Katılımcı 12	-1.553E+07	0.2394	0.0702
Anksiyeteli Grup	Katılımcı 23	-1.560E+07	0.2752	0.0594
	Katılımcı 25	-1.413E+07	0.2567	0.1423
	Katılımcı 34	-1.383E+07	0.2287	0.0842
	Katılımcı 41	-1.017E+07	0.2090	0.1207

Değerler, 4 kontrol ve 4 anksiyete tespiti yapılmış katılımcının FZ kanallarından elde edilmiştir.

Tablo 3. Parametreye göre sınıflandırma başarısı

Model	Karmaşıklık	Hareketlilik	Entropi	Tüm Param.
KNN	0.860	0.826	0.709	0.884
MLP	0.779	0.791	0.581	0.849
RF	0.721	0.709	0.663	0.767

KNN: k- En Yakın Komşu Algoritması, MLP: Çok Katmanlı Algılayıcı Algoritması, RF: Rastgele Orman Algoritması. Özellik isimleriyle başlıklandırılan sütunlarda yalnızca ilgili özelliğin kullanılarak sınıflandırmasının sonuçları gösterilmektedir. Tüm parametre başlığına sahip sütun ise 3 parametrenin bir arada kullanılarak yapıldığı sınıflandırma sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 4. Tüm parametrelerin bir arada verildiği sınıflandırmanın sonuçlarına ait ölçütler

	Doğruluk	Grup	Kesinlik	Duyarlılık	F-Ölçütü	ROC Alanı	PRC Alanı
kNN	%88.4	Kontrol	0.864	0.905	0.884	0.899	0.851
		Anksiyete	0.905	0.864	0.884	0.918	0.879
		Ağırlıklı Ort.	0.885	0.884	0.884	0.909	0.865
MLP	%84.9	Kontrol	0.854	0.833	0.843	0.925	0.940
		Anksiyete	0.844	0.864	0.854	0.924	0.882
		Ağırlıklı Ort.	0.849	0.849	0.849	0.924	0.910
RF	%76.7	Kontrol	0.775	0.738	0.756	0.842	0.819
		Anksiyete	0.761	0.795	0.778	0.842	0.825
		Ağırlıklı Ort.	0.768	0.767	0.767	0.842	0.822

Tüm parametrelerin bir arada kullanılarak gerçekleştirildiği sınıflandırmalarda kNN %88.4 ile en yüksek başarı sonucu verirken RO sınıflandırıcısı %76.7 ile en düşük başarı oranıyla sonuçlanmıştır. MLP ise kNN'e göre düşük fakat RO'dan çok daha yüksek olan %84.9 oranıyla sonuçlanmıştır. Bu sınıflandırıcıların ölçütleri Tablo 4'te detaylı olarak gösterilmektedir.

4 Tartışma ve sonuç

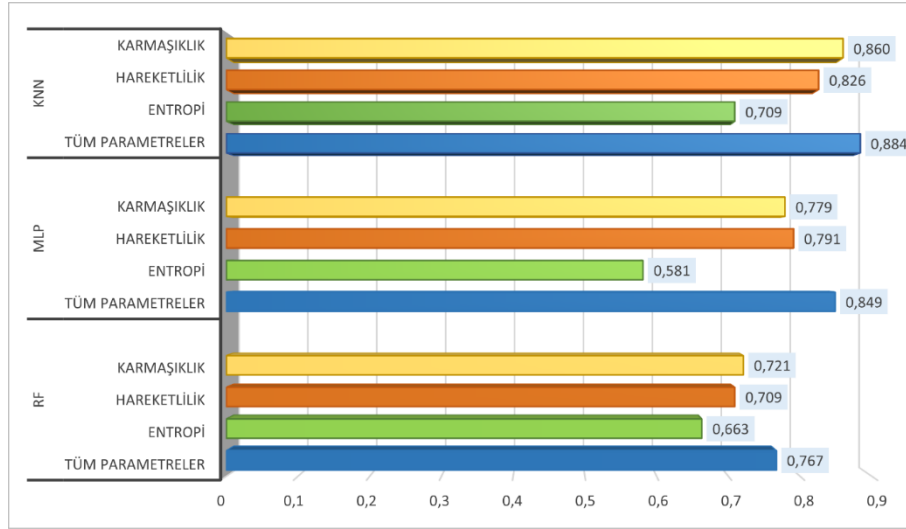
Bu çalışma toplum içinde sıkça görülen anksiyete bozukluğunun beyin aktivitesi üzerindeki etkisini sinyal işleme ve makine öğrenmesi metotlarıyla anlamayı amaçlamıştır.

Son yıllarda anksiyete bozukluğu olan bireylerde dinlenme durumundaki beyin fonksiyonlarının ve fonksiyonel bağlantısallığın incelenmesine yönelik çalışmalar artış göstermiştir. Ancak çalışmalarda kullanılan küçük örneklem büyüklükleri, kullanılan yöntemlerin farklılık göstermesi gibi nedenlerle sonuçlarda tutarsızlık görülmektedir, dolayısıyla daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır [57, 58]. Bu çalışmada herhangi bir görev olmaksızın, anksiyete özelinde beyin nörobiyolojisinin daha iyi anlaşılabilmesi ve psikiyatrik tanı doğruluğunu artırmak amacıyla objektif yöntemler kullanılarak dinlenme durumu EEG kaydı incelenmiştir. Görevlere dayalı yöntemlere kıyasla dinlenme durumu, görev performansının getirebileceği karmaşıklıklardan etkilenmez yani görev performansının potansiyel karıştırıcı etkilerine sahip değildir [58]. Görev olmaksızın alınan elektrofizyolojik kayıtlar anksiyete gibi klinik durumların altında yatan içsel beyin mekanizmalarının anlaşılmasına özellikle fayda sağlar. Dinlenme durumu EEG'si diğer birçok psikiyatrik bozukluğun değerlendirilmesinde de sıkça kullanılmaktadır [59]. Son yıllarda psikiyatrik tanıların nörobiyolojik ölçümlerle desteklenmesinin öneminin artmasıyla makine öğrenme teknikleri ile tanı ve tedavi cevaplarının değerlendirilmesine yönelik çalışmalar ivme kazanmıştır. Mokaten ve arkadaşları, Evrişimli Sinir Ağrı kullanarak EEG verilerinden anksiyete düzeyini belirlemeyi %87'lik bir başarıyla gerçekleştirebilmişlerdir [60]. Al-Ezzi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada fuzzy entropi kullanılarak sınıflandırma yapılmış ve entropi şiddetine göre yüksek doğrulukla sınıflandırma yapabilmişlerdir [61]. Bu çalışmada ise farklı özneliklerin ayrı ayrı veya bir arada kullanılma durumunun makine öğrenmesinde sınıflandırma

başarısı üzerindeki etkisi incelenmiş ve farklı algoritmalar için bu sonuçlar sunulmuştur. Li ve arkadaşları yaptıkları çalışmada katılımcıların kayıtları anksiyeteyi tetikleyecek görevlerle gerçekleştirmişlerdir [41]. Aynı kişilerden beş farklı kaygı seviyesi için alınan EEG kayıtlarının analizi gerçekleştirilmiştir ve dinlenme durumu EEG kayıtları anksiyetenin olmadığı referans durum olarak değerlendirilmiştir. 5 durum anksiyetenin sürekli olmadığı durumlar için kademeli tetikleme ile uyaran tipine göre sağlıklı kişilerde karşılaştırılmıştır. Lineer ve lineer olmayan özellikler kullanılarak iki farklı sınıflandırmada karşılaştırmalar yapılmıştır. Bizim çalışmamızda ise anksiyetenin belirlenmesinde süregelen etki ele alınmış ve klinik değerlendirmelere uygun olarak gruplar oluşturulmuştur. Böylece psikiyatri açısından bir değerlendirme metodu oluşturulması amaçlanmıştır.

Sınıflandırıcı performansların karşılaştırıldığı Şekil 6'da sarı renkte karmaşıklık verilerinin sınıflandırılma sonuçları verilmiştir. Turuncu renk hareketliliği, yeşil renk ise entropi değerlerinin kullanıldığı sınıflandırılma başarılarını göstermektedir. Sınıflandırma sonuçlarına bakıldığında entropi, karmaşıklık ve hareketlilik parametrelerinin hem ayrı ayrı kullanıldığı durumlarda hem de bir arada kullanıldığı durumda kNN algoritması, başarı oranı en yüksek çıkan sınıflandırıcı olmuştur. Ayrıca entropi ve Hjorth parametreleri birlikte kullanıldığında parametrelerin tek başlarına kullanıldığı durumla karşılaştırıldığında tüm sınıflandırıcılar için başarı oranının arttığı gözlenmiştir. Bu sonuç EEG'de farklı özelliklerin bir arada kullanılmasının sınıflandırıcı başarısını artırabileceğini göstermiştir.

Anksiyeteli kişilerde genellikle depresyon gözlemlendiği bilinmektedir [62-64]. Çalışmada katılımcılara Beck Anksiyete Ölçeği'nin yanı sıra Türkçeye uyarlanmış Beck Depresyon Ölçeği de uygulanmıştır. Anksiyete ve depresyon puanlarının korelasyonuna bakıldığında iki parametre arasında pozitif yönlü anlamlı bir ilişki gözlenmiştir ($r=0.552$; $p=0.000$). Bu sonuç literatürle uyumludur [64]. Sonuç olarak, getirdiği negatif sonuçlar düşünüldüğünde (bireylerin yaşam kalitesindeki düşüş, eşlik eden komirbiditeler, ekonomik yük vb.) anksiyetenin teşhisine yönelik biyobelirteçlerin belirlenmesi oldukça önemlidir. İleride yapılacak çalışmalarda daha fazla katılımcı olması durumunda anksiyete dereceleri ile sınıflandırma yapıp anksiyete konusunun bütünüyle ele alınması planlanmaktadır.



Şekil 6. Parametreler ayrı ayrı veya bir arada verilmesine ilişkin sınıflandırıcı performansların karşılaştırıldığı grafik

Teşekkür

Çalışma TÜBİTAK tarafından 121E502 proje koduyla desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %8

Kaynaklar

- [1] American Psychiatric Association, Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders, American Psychiatric Association Publishing, 2022. <https://doi.org/10.1176/appi.books.9780890425787>.
- [2] R.C. Kessler, M. Petukhova, N.A. Sampson, A.M. Zaslavsky, H.U. Wittchen, Twelve-month and lifetime prevalence and lifetime morbid risk of anxiety and mood disorders in the United States. *The International Journal of Methods in Psychiatric Research*, 21, 169–184, 2012. <https://doi.org/10.1002/mpr.1359>.
- [3] X. Yang, Y. Fang, H. Chen, T. Zhang, X. Yin, J. Man, L. Yang, M. Lu, Global, regional and national burden of anxiety disorders from 1990 to 2019: results from the Global Burden of Disease Study 2019, *Epidemiology and Psychiatric Sciences*, 30, e36, 2021.
- [4] B.J. Casey, F.S. Lee, Optimizing treatments for anxiety by age and genetics. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1345, 16–24, 2015. <https://doi.org/10.1111/nyas.12746>.
- [5] T. Allison, Recording and interpreting event-related potentials, in: E. Donchin (Ed.). *Cogn. Psychophysiol. Event-Related Potentials Study Hum. Cogn.*, Laurence Erlbaum Associates, Hillsdale NJ, 1986.
- [6] Ü.İ. Alkaç, Beyin Araştırmaları Tarihinde Bir Gezinti : Elektronörofizyoloji. *Klinik gelişim*, 3, 14–19, 2009.
- [7] S. Aliakbaryhosseinabadi, E.N. Kamavuako, N. Jiang, D. Farina, N. Mrachacz-Kersting, Classification of EEG signals to identify variations in attention during motor task execution. *Journal of Neuroscience*

Methods, 284, 27–34, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2017.04.008>.

- [8] S.M. Snyder, T.A. Rugino, M. Hornig, M.A. Stein, Integration of an EEG biomarker with a clinician's ADHD evaluation. *Brain and Behavior*, 5, 1–17, 2015. <https://doi.org/10.1002/brb3.330>.
- [9] J.S. Damoiseaux, S.A.R.B. Rombouts, F. Barkhof, P. Scheltens, C.J. Stam, S.M. Smith, C.F. Beckmann, Consistent resting-state networks across healthy subjects. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103, 13848–13853, 2006. <https://doi.org/10.1073/pnas.0601417103>.
- [10] D. Mantini, M.G. Perrucci, C. Del Gratta, G.L. Romani, M. Corbetta, Electrophysiological signatures of resting state networks in the human brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104, 13170–13175, 2007. <https://doi.org/10.1073/pnas.0700668104>.
- [11] F. Li, L. Jiang, Y. Liao, Y. Si, C. Yi, Y. Zhang, X. Zhu, Z. Yang, D. Yao, Z. Cao, P. Xu, Brain variability in dynamic resting-state networks identified by fuzzy entropy: A scalp EEG study. *Journal of neural engineering*, 18, 46097, 2021. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/ac0d41>.
- [12] O. Al Zoubi, A. Mayeli, A. Tsuchiyagaito, M. Misaki, V. Zotev, H. Refai, M. Paulus, J. Bodurka, R.L. Aupperle, S.S. Khalsa, J.S. Feinstein, J. Savitz, Y.H. Cha, R. Kuplicki, T.A. Victor, EEG microstates temporal dynamics differentiate individuals with mood and anxiety disorders from healthy subjects. *Frontiers in Human Neuroscience*, 13, 1–10, 2019. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00056>.
- [13] A. Al-Ezzi, N. Kamel, I. Faye, E. Gunaseli, Analysis of default mode network in social anxiety disorder: Eeg resting-state effective connectivity study. *Sensors*, 21, 1–19, 2021. <https://doi.org/10.3390/s21124098>.
- [14] S.M. Pincus, Approximate entropy as a measure of irregularity for psychiatric serial metrics. *Bipolar*

- Disorders, 8, 430–440, 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1399-5618.2006.00375.x>.
- [15] N. Kannathal, M.L. Choo, U.R. Acharya, P.K. Sadasivan, Entropies for detection of epilepsy in EEG. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 80, 187–194, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2005.06.012>.
- [16] T. Batbat, A. Güven, N. Dolu, Evaluation of divided attention using different stimulation models in event-related potentials. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 57, 2069–2079, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11517-019-02013-x>.
- [17] S.-H. Oh, Y.-R. Lee, H.-N. Kim, A Novel EEG Feature Extraction Method Using Hjorth Parameter. *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, 2, 106–110, 2014. <https://doi.org/10.12720/ijeee.2.2.106-110>.
- [18] T. Elbert, W. Lutzenberger, B. Rockstroh, P. Berg, R. Cohen, Physical aspects of the EEG in schizophrenics. *Biological psychiatry*, 32, 595–606, 1992. [https://doi.org/10.1016/0006-3223\(92\)90072-8](https://doi.org/10.1016/0006-3223(92)90072-8).
- [19] X.T. Li, The distribution of left and right handedness in Chinese people. *Acta Psychologica Sinica*, 3, 268–276, 1983.
- [20] M. Altunkaynak, Dikkat Eksikliği Ve Hiperaktivitesi Olan Hastalarda Kognitif Fonksiyonların Uyarılmış Potansiyel Ve Fonksiyonel Yakın Kızıl Ötesi Spektroskopisi Yöntemleriyle İncelenmesi. Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2021.
- [21] L. Guo, Y. Wu, L. Zhao, T. Cao, W. Yan, X. Shen, Classification of mental task from EEG signals using immune feature weighted support vector machines. *IEEE Transactions on Magnetics*, 47, 866–869, 2011. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2010.2072775>.
- [22] Q. Meng, W. Zhou, Y. Chen, J. Zhou, Feature analysis of epileptic EEG using nonlinear prediction method. 2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology, Soc. EMBC'10, pp. 3998–4001, IEEE, 2010. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2010.5628001>.
- [23] Y. Li, Y. Fan, C. Qian, EEG nonlinear feature detection in brain-computation interface. 2009 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, pp. 1–4, IEEE, 2009. <https://doi.org/10.1109/ICBBE.2009.5162681>.
- [24] W.X. He, X.G. Yan, X.P. Chen, H. Liu, Nonlinear feature extraction of sleeping EEG signals. 2005 IEEE engineering in medicine and biology 27th annual conference, pp. 4614–4617, IEEE, 2005. <https://doi.org/10.1109/iembs.2005.1615498>.
- [25] X.W. Wang, D. Nie, B.L. Lu, Emotional state classification from EEG data using machine learning approach. *Neurocomputing*, 129, 94–106, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2013.06.046>.
- [26] M. Čukić, V. López, J. Pavón, Classification of depression through resting-state electroencephalogram as a novel practice in psychiatry: review. *Journal of Medical Internet Research*, 22, e19548, 2020. <https://doi.org/10.2196/19548>.
- [27] D. Librenza-Garcia, B.J. Kotzian, J. Yang, B. Mwangi, B. Cao, L.N. Pereira Lima, M.B. Bermudez, M.V. Boeira, F. Kapczinski, I.C. Passos, The impact of machine learning techniques in the study of bipolar disorder: A systematic review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 80, 538–554, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.07.004>.
- [28] H. Cai, J. Han, Y. Chen, X. Sha, Z. Wang, B. Hu, J. Yang, L. Feng, Z. Ding, Y. Chen, J. Gutknecht, A Pervasive Approach to EEG-Based Depression Detection. *Complexity*, 2018, 1–13, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/5238028>.
- [29] D. Şayık, D. Yiğit, A. Açıköz, E. Çolak, Ö. Mumcu, Koronavirüs anksiyete ölçeğinin Türkçe geçerliliği ve güvenilirliği. *Eskisehir Medical Journal*, J. 2, 16–22, 2021.
- [30] F. Yıldırım, İ.Ö. İlhan, Genel öz yeterlilik ölçeği Türkçe formunun geçerlilik ve güvenilirlik çalışması. *Türk Psikiyatri Dergisi*, 21, 301–308, 2010.
- [31] M. Ulusoy, N. H. Sahin, & H. Erkmén, Turkish version of the Beck Anxiety Inventory: psychometric properties. *Journal of cognitive psychotherapy*, 12(2), 163, 1998.
- [32] A. T. Beck, N. Epstein, G. Brown & Steer, R., Beck anxiety inventory. *Journal of consulting and clinical psychology*, 7(3), 195–205, 1993.
- [33] A. Babayigit, & E. Erdem, Şanlıurfa Örneğinde Depresif Belirtiler ve Anksiyete Yaygınlığının COVID-19 ve Psikolojik Dayanıklılık ile İlişkisinin İncelenmesi. *Kıbrıs Türk Psikiyatri ve Psikoloji Dergisi*, 5(3), 239–249, 2023.
- [34] L. A. Schmidt, K. L. Poole, R. Hassan, T. Willoughby, Frontal EEG alpha-delta ratio and social anxiety across early adolescence. *International Journal of Psychophysiology*, 175, 1–7, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2021.12.011>.
- [35] Ü. Işık, A. Güven, T. Batbat, Evaluation of Emotions from Brain Signals on 3D VAD Space via Artificial Intelligence Techniques. *Diagnostics*, 13, 2141, 2023. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13132141>.
- [36] H.U. Amin, A.S. Malik, R.F. Ahmad, N. Badruddin, N. Kamel, M. Hussain, W.T. Chooi, Feature extraction and classification for EEG signals using wavelet transform and machine learning techniques. *Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine*, 38, 139–149, 2015. <https://doi.org/10.1007/s13246-015-0333-x>.
- [37] O. Bahadır, H. Türkmençalıkoğlu, Bilgi Kuramında Shannon Entropisi ve Uygulamaları. *The European Journal of Science and Technology*, 491–497, 2022. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1039771>.
- [38] T. Batbat, İşitsel ve görsel uyarılar ile elde edilen uyarılmış potansiyel sinyallerinden farklı dikkat durumlarının değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2020.
- [39] R.M. Mehmood, H.J. Lee, A novel feature extraction method based on late positive potential for emotion recognition in human brain signal patterns. *Computers*

- & Electrical Engineering, 53, 444-457, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2016.04.009>.
- [40] R. Jenke, A. Peer, M. Buss, Feature extraction and selection for emotion recognition from EEG. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 5, 327–339, 2014. <https://doi.org/10.1109/TAFFC.2014.2339834>.
- [41] Z. Li, X. Wu, X. Xu, H. Wang, Z. Guo, Z. Zhan, L. Yao, The Recognition of Multiple Anxiety Levels Based on Electroencephalograph. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 13, 519–529, 2022. <https://doi.org/10.1109/TAFFC.2019.2936198>.
- [42] P. Bhuvaneshwari, J.S. Kumar, Influence of linear features in nonlinear electroencephalography (EEG) signals. *Procedia Computer Science*, 47, 229–236, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.03.202>.
- [43] N.S. Altman, An introduction to kernel and nearest-neighbor nonparametric regression. *The American Statistician*, 46, 175–185, 1992. <https://doi.org/10.1080/00031305.1992.10475879>.
- [44] S. Ibrahim, R. Djemal, A. Alsuwailem, S. Gannouni, Electroencephalography (EEG)-based epileptic seizure prediction using entropy and K-nearest neighbor (KNN). *Communications in Science and Technology*, 2, 6–10, 2017. <https://doi.org/10.21924/cst.2.1.2017.44>.
- [45] M.N.A.H. Sha'abani, N. Fuad, N. Jamal, M.F. Ismail, kNN and SVM Classification for EEG: A Review. *Lect. Notes Electr. Eng.*, pp. 555–565, Springer, 2020. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2317-5_47.
- [46] F. Murtagh, Multilayer perceptrons for classification and regression. *Neurocomputing*, 2, 183–197, 1991. [https://doi.org/10.1016/0925-2312\(91\)90023-5](https://doi.org/10.1016/0925-2312(91)90023-5).
- [47] R. Chatterjee, T. Bandyopadhyay, EEG Based Motor Imagery Classification Using SVM and MLP. *Proceedings of the 5th International Conference on Electrical, Control & Computer Engineering*, 29th July 2019, pp. 84–89, Kuantan, Pahang, Malaysia, IEEE, 2016. <https://doi.org/10.1109/CINE.2016.22>.
- [48] L. Breiman, Random forests. *Machine Learning*, 45, 5–32, 2001.
- [49] M. Koçyiğit, A. Güven, F. Çam, Beyin Bilgisayar Arayüzünün Geliştirilmesi İçin Hayali Motor Görüntü Tabanlı Yakın Kızılötesi Spektroskopi Sinyallerinin Sınıflandırılması. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9, 1–8, 2020. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.606507>.
- [50] W. Chen, Y. Wang, G. Cao, G. Chen, Q. Gu, A random forest model based classification scheme for neonatal amplitude-integrated EEG. *Biomedical engineering online*, 13, 1–13, 2014. <https://doi.org/10.1186/1475-925X-13-S2-S4>.
- [51] A. Arsalan, M. Majid, A study on multi-class anxiety detection using wearable EEG headband. *J. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 13, 5739–5749, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12652-021-03249-y>.
- [52] S.I. Dimitriadis, C.I. Salis, D. Liparas, An automatic sleep disorder detection based on EEG cross-frequency coupling and random forest model. *Journal of Neural Engineering*, 18, 46064, 2021. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/abf773>.
- [53] C. Kamarajan, B.A. Ardekani, A.K. Pandey, D.B. Chorlian, S. Kinreich, G. Pandey, J.L. Meyers, J. Zhang, W. Kuang, A.T. Stimus, B. Porjesz, Random forest classification of alcohol use disorder using EEG source functional connectivity, neuropsychological functioning, and impulsivity measures. *Behavioral Sciences*, 10, 62, 2020. <https://doi.org/10.3390/bs10030062>.
- [54] A. Tharwat, Classification assessment methods. *Applied computing and informatics*, 17, 168–192, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.aci.2018.08.003>.
- [55] Ž. Vujović, Classification Model Evaluation Metrics. *International Journal of Advanced Computer Science and applications*, 12, 599–606, 2021. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2021.0120670>.
- [56] T. Saito, M. Rehmsmeier, The precision-recall plot is more informative than the ROC plot when evaluating binary classifiers on imbalanced datasets. *PLoS One*, 10, e0118432, 2015. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118432>.
- [57] A. Zugman, L. Jett, C. Antonacci, A. M. Winkler, & D. S. Pine, A Systematic Review and Meta-Analysis of Resting-state fMRI in Anxiety Disorders: Need for Data Sharing to Move the Field Forward. *Journal of Anxiety Disorders*, 102773, 2023.
- [58] S. Mizzi, M. Pedersen, V. Lorenzetti, M. Heinrichs, & I. Labuschagne, Resting-state neuroimaging in social anxiety disorder: a systematic review. *Molecular Psychiatry*, 27(1), 164-179, 2022.
- [59] ND. Woodward, C.J. Cascio. Resting-State Functional Connectivity in Psychiatric Disorders. *JAMA Psychiatry*, 72(8), 743-4. 2015. <https://doi.org/10.1001/jamapsychiatry.2015.0484>.
- [60] L.S. Mokatren, R. Ansari, A.E. Cetin, A.D. Leow, O. Ajilore, H. Klumpp, F.T.Y. Vural, EEG Classification based on Image Configuration in Social Anxiety Disorder. *International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER)*, pp. 577–580, IEEE, 2019. <https://doi.org/10.1109/NE R.2019.8717152>.
- [61] A. Al-Ezzi, A.A. Al-Shargabi, F. Al-Shargie, A.T. Zahary, Complexity Analysis of EEG in Patients With Social Anxiety Disorder Using Fuzzy Entropy and Machine Learning Techniques. *IEEE Access*, 10, 39926–39938, 2022. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3165199>.
- [62] J.W.G. Tiller, Depression and anxiety. *The Medical Journal of Australia*, 199, 28–31, 2013. <https://doi.org/10.5694/mja12.10628>.
- [63] H. Türçapar, Anksiyete Bozukluğu ve Depresyonun Tanısal İlişkileri. *Klinik Psikiyatri*, 4, 12–16, 2004.
- [64] O. Karamustafaloğlu, H. Yumrukçal, Depresyon ve anksiyete bozuklukları. *Şişli Etfal Hastanesi Tıp Bülteni*, 45, 65–74, 2011.





Doğal zeolit ve bentonitin karakterizasyonu ve CO₂ tutumunda kullanımı

Characterization of natural zeolite and bentonite and their use in CO₂ capture

Mehmet Şahin Ataş^{1,*} 

¹ Konya Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 42075, Konya, Türkiye

Öz

Bu çalışmada doğal zeolit ve bentonit herhangi bir işleme tabi tutulmadan CO₂ tutumunda adsorban malzemesi olarak kullanılmıştır. Temin edilen zeolit ve bentonitin yapısal özellikleri, X-ışını kırınımı (XRD) ve Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrofotometresi (FTIR) kullanılarak karakterize edilmiştir. Morfolojik özellikleri Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) ve N₂-adsorpsiyon-desorpsiyon ölçümleri ise Brunauer–Emmett–Teller (BET) cihazları kullanılarak karakterize edilmiştir. Zeolit ve bentonitin BET yüzey alanları ve CO₂ yakalama performansı hem statik hem de akış koşulları altında incelenmiştir. Zeolit, yüksek mezogözenek hacmi ile 125,23 m²/g'lık yüksek bir BET yüzey alanı ve 25 °C ve 1 bar'da yüksek CO₂ yakalama kapasitesi (38,7 mg/g) sergilemiştir. Buna ek olarak, Bentonit malzemesi zeolite göre daha düşük 53,79 m²/g'lık bir BET yüzey alanı ve daha düşük CO₂ yakalama kapasitesi (20,53 mg/g) göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Zeolit, Bentonit, CO₂ tutumu, Adsorpsiyon

1 Giriş

Atmosfere sera gazı olarak bilinen N₂O, CH₄ ve CO₂ gibi gazların salınmasıyla başlayan iklim değişikliğinin etkileri dünya genelinde endişe kaynağı olmuştur [1-4]. Karbon dioksit (CO₂), en belirgin sera gazlarından biri olup, yanmış fosil yakıtlarının ve petrol ürünlerinin ana yan ürünü olarak ortaya çıkmaktadır [5, 6]. Doğal gaza olan talebin artmasından dolayı, beklenmedik bir şekilde CO₂ miktarını artırmakta ve bu da küresel ısınma krizine yol açmaktadır. Enerji kullanımının verimliliğini artırmanın yanı sıra, atmosferden CO₂'nin tutumunu ve CO₂ emisyonlarını azaltmak için alternatif yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır [7-9]. CO₂'yi atmosferden uzaklaştırmak için geleneksel yöntem olan kemosorpsiyon yaklaşımı, Lewis asidi (CO₂) ile Lewis bazının (amin) güçlü etkileşimi aracılığıyla sulu amin çözeltileri kullanılmaktadır. Ekipmanın korozyonu ve ciddi ekonomik maliyet nedeniyle, fiziksel adsorpsiyon esaslı gözenekli malzemeler üzerinde alternatif yöntemlere acil bir ihtiyaç vardır [10-12].

Zeolitler [4, 13-15], bentonitler [16-18], alümina [19], metal-organik yapılar (MOF) [20, 21], kovalent organik polimerler (COP) [22], aktif karbonlar [23], metalik nanoalaşımalar [24, 25], nanofiberler [26] ve mozoporus silica [27] gibi birçok geleneksel adsorban, CO₂ adsorpsiyonu için kullanılmaktadır. Bu malzemeler arasında

Abstract

In this study, natural zeolite and bentonite were used as adsorbent material in CO₂ sequestration without any treatment. The structural properties of the supplied zeolite and bentonite were characterized using X-ray diffraction (XRD) and Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR). Morphological properties were characterized using Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) and N₂-adsorption-desorption measurements using Brunauer–Emmett–Teller (BET) instruments. BET surface areas and CO₂ capture performance of zeolite and bentonite were investigated under both static and flow conditions. The zeolite exhibited a high mesopore volume, a high BET surface area of 125.23 m²/g and a high CO₂ capture capacity (38.7 mg/g) at 25 °C and 1 bar. In addition, Bentonite material showed a lower BET surface area of 53.79 m²/g and lower CO₂ capture capacity (20.53 mg/g) than zeolite.

Keywords: Zeolite, Bentonite, CO₂ capture, Adsorption

bulunan bentonit ve zeolitler, yüksek yüzey alanlarına sahip gözenekli, kristalin ve doğal kil mineralleridir [28, 29]. Etkili bir CO₂ yakalama sisteminin geliştirilmesi, küresel sera gazı emisyonlarının azaltılmasında kritik öneme sahiptir. Zeolit ve bentonitler, yüzeylerinde bulunan sodyum iyonlarından dolayı CO₂ tutumunda kullanımı oldukça yaygındır. CO₂'nin sodyum iyonlarına afinitelerinin yüksek olması bu malzemelerin CO₂ tutumunda kullanımını daha da ön plana çıkarmaktadır [30]. Aynı zamanda yüksek yüzey alanları ve ayarlanabilir gözenek fonksiyonelliği sayesinde büyük miktarlarda CO₂'nin seçici olarak adsorpsiyonunu mümkün kıldığı için CO₂ yakalama malzemeleri için özellikle umut vericidir [31, 32]. Herhangi bir CO₂ yakalama işleminde temel maliyet, doymuş hale gelmiş CO₂ ile yeniden doldurulan adsorbanın tekrar tekrar kullanılmasıdır. Zeolit ve bentonitlerdeki gözenek yüzeyleri ile CO₂'nin etkileşimi, belirli bir miktarda CO₂'nin yakalanması için gereken enerjiyi en aza indirmek ve yüzey modifikasyonu gerekmektedir [33-35].

Zeolit ve bentonit ile ilgili atık sulardan boya giderimi [36], ağır metal iyonu giderimi [37] ve zehirli gazların bertarafı [32] için birçok çalışma yapılmıştır. Doğal zeolit ve bentonitin tek başına kullanımı ile ilgili çok az çalışma yapılmıştır. Özellikle Seydişehir/KONYA yöresinden elde

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: msatas@ktun.edu.tr (M. Ş. Ataş)

Geliş / Received: 22.08.2023 Kabul / Accepted: 01.02.2024 Yayınlanma / Published: 15.04.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1348145

edilen bu adsorbanların karakterizasyonu ve CO₂ tutumu ile ilgili çalışma bulunmamaktadır.

Zeolit ve bentonit küresel olarak bol miktarda bulunan ve düşük maliyetli olması dikkate alındığında gelecekte bu kaynaklar kullanılarak CO₂ tutumu gerçekleştirilebilir. Bu çalışmanın amacı, adsorban olarak kullanılan zeolit ve bentonit malzemelerinin CO₂ tutumunda kullanılmak üzere bir adsorban olarak potansiyelini değerlendirmektir. Temin edilen zeolit ve bentonit adsorbanları geniş bir sıcaklık aralığında CO₂ tutumu için karakterize edilmiş ve CO₂ tutum çalışmaları yapılmıştır.

2 Materyal ve metod

2.1 Materyal

Bu çalışmada kullanılan malzemeler olan Zeolit ve Bentonit Seydişehir/Konya bölgesinde Jeoloji mühendisleri tarafından yapılan arazi incelemelerinde elde edilmiş ve bu çalışmada kullanılmıştır.

2.2 Karakterizasyon

Temin edilen zeolit ve bentonit hiçbir işleme tabi tutulmadan kullanılmıştır. Kullanılan zeolit ve bentonitin parçacık boyutları “Malvern Instruments™ Mastersizer 2000e” model lazer kırınım yöntemini kullanan partikül boyut ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Cihaz ölçümleri saf su ortamında, 2700 dev/dk pervane hızında ve 5 ölçümün ortalamasını alarak gerçekleştirmektedir. Parçacık boyut ölçüm cihazı kullanılarak kullanılan zeolit numunelerinin parçacık boyutları 2,68 µm ve bentonit numunelerin parçacık boyutları 1,76 µm olarak elde edilmiştir. Ayrıca malzemelerin oksit içerikleri, eser element ve tutuşma değerlerindeki kayıp Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Geliştirme Merkezinde bulunan PERKIN ELMER/ICP OES OPTİMA 2100 DV cihazı kullanılarak belirlenmiştir. X-Işını Floresan (XRF) spektrometresi, elementel ve kimyasal bileşimi belirlemek için kullanılan önemli cihazlardan biridir. Bu çalışmada ODTÜ merlab bünyesinde yer alan Rigaku ZSX Primus II cihazı ile zeolit ve bentonitin kimyasal analizi yapılmış ve Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Zeolit ve Bentonite ait XRF analizi

Numuneler	Bileşim (%)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	CaO
Zeolit	57.4	15.7	1.7	5.5	6.7	3.5	3.8
Bentonit	61.3	16.8	3.1	2.7	2.3	1.4	3.9

Zeolit ve Bentonit malzemelerinin faz bileşenleri ve kristal yapıları X-Işını kırınımı (XRD) desenleri Bruker D8 Advance X-Işını difraktometresi ile 2°/dakika tarama hızında 2θ = 5-50° aralığında Cu-Kα radyasyonu (λ = 1.54060 Å) ve 40 kV'luk çalışma voltajına sahip XRD cihazı kullanılarak elde edilmiştir. IR absorpsiyon ölçümleri Perkin Elmer 1600 Fourier Dönüşüm Kızılötesi Spektrumları (FTIR) cihazı kullanılarak incelenmiştir. Ölçümler; 4000-400 cm⁻¹ aralığında, 4 cm⁻¹ spektral çözünürlük kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zeolit ve bentonitin boyutları ve morfolojik özellikleri ise Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) kullanılarak belirlenmiş ve elementel

bileşimi belirlemek için enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) kullanılmıştır. Bentonit ve zeolitlerin gözenekliliğini değerlendirmek için, numuneler ölçümlerden önce vakum altında 24 saat boyunca 120 °C’de degaz işlemine tabi tutulduktan sonra, 77 K’de Micromeritics Tristar II 3020 hızlandırılmış yüzey alanı ve porozimetri analizörü ile N₂ adsorpsiyon izotermi elde edilmiştir. Adsorpsiyon desorpsiyon izotermi BET (P/Po = 0.01-0.25), Langmuir (P/Po = 0.1-0.35) yüzey alanlarını, gözenek boyutlarını ve gözenek hacmi dahil olmak üzere gözenek parametrelerini elde etmek için kullanılmıştır.

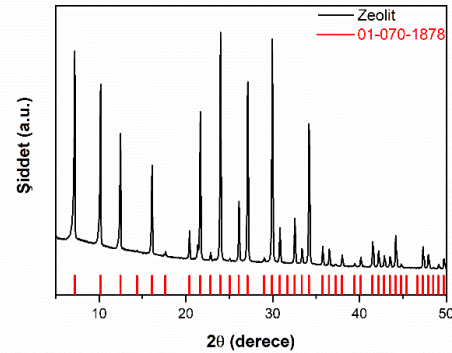
2.3 CO₂ tutumu

Zeolit ve Bentonit için düşük basınçlı CO₂ ve N₂ adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi 273 ve 298 K’de statik bir volümetrik sistem kullanılarak ölçülmüştür (Micromeritics Tristar II 3020). Adsorpsiyon ve desorpsiyon sırasında sıcaklık bir sirkülör kullanılarak sabit tutulmuştur. Adsorpsiyon ölçümlerinden önce numuneler 120 °C’de 24 saat süreyle kurutulmuştur. Numuneler, vakum (5×10⁻³ mmHg) altında 423 K’e kadar 1 K/dk ısıtma hızıyla sıcaklık artırılarak yerinde aktive edilmiş ve gaz tutum ölçümleri yapılmadan önce sıcaklık ve vakum 5 saat süreyle muhafaza edilmiştir. Tekrarlanabilirliği sağlamak için tüm adsorpsiyon-desorpsiyon deneyleri üç kez gerçekleştirilmiştir. Her üç deneyden elde edilen izoterm noktalarında gözle görülür bir farklılık bulunmamıştır.

3 Bulgular ve tartışma

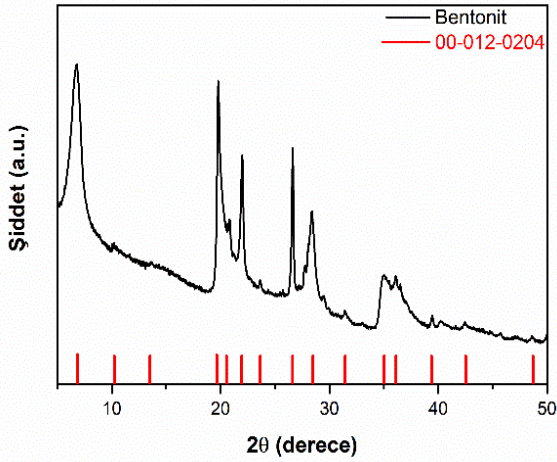
3.1 Yapısal analiz

Adsorbanların kristallığı XRD cihazı kullanılarak değerlendirilmiştir. Temin edilen zeolit ve bentonitin kırınım desenleri Şekil 1 ve 2’de gösterilmektedir. XRD desenindeki 7.2, 10.1, 12.4, 16.1, 21.6, 23.9, 26.9, 29.9 ve 34.2°’de keskin pikler zeolit kristal yapısını göstermektedir (Şekil 1). Zeolit için elde edilen kırınım deseni yapılan çalışmalarda zeolit XRD analizi ile uyumlu olduğu görülmüştür [32, 36, 38]. Ayrıca elde edilen kırınım pikleri incelendiğinde yüksek şiddetli piklerin kübik kristal yapısındaki zeolite ait 01-070-1878 kart numaralı JCPDS verileri ile oldukça örtüştüğü görülmektedir [39, 40]. Zeolit pikleri dışında herhangi bir pike rastlanılmamıştır. Bu da temin edilen malzemelerin yüksek saflıkta olduğunu göstermektedir.



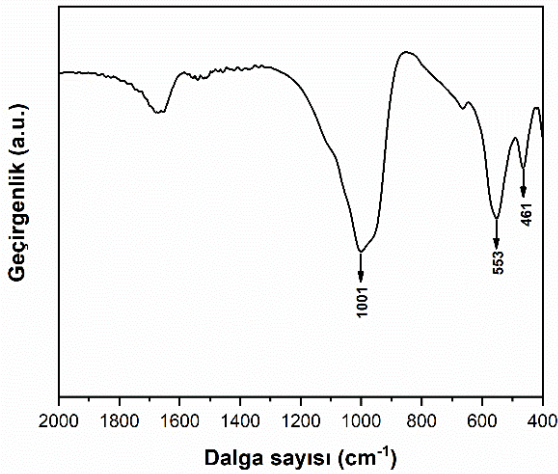
Şekil 1. Zeolit ait XRD kırınım deseni

Bentonite ait XRD kırınım deseni Şekil 2’de verilmiştir. Bentonite ait XRD kırınım deseninde $2\theta=6.7^\circ$, 19.7° , 21.9° ve 26.6° dört tepe noktası elde edilmiştir. Bu tepe noktaları incelendiğinde $2\theta=6.7^\circ$, 19.7° ve 26.6° kırınım pikleri montmorillonit mineraline ait kırınım desenini göstermektedir. $2\theta=21.9^\circ$ kırınım desenindeki pik kristobalitin (kuvarın bir polimorfu) yansımalarına karşılık gelmektedir. Bu yüksek şiddetteki XRD kırınım pikleri standart JCPDS dosyası (kart no.00-012-0204) ile iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür [32, 41, 42]. Ayrıca bentonitin mineralleri dışında farklı bir XRD kırınım pikine rastlanılmamıştır. Seydişehir/Konya bölgesinde temin edilen Zeolit ve bentonitin yüksek saflıkta olduğu görülmüştür.



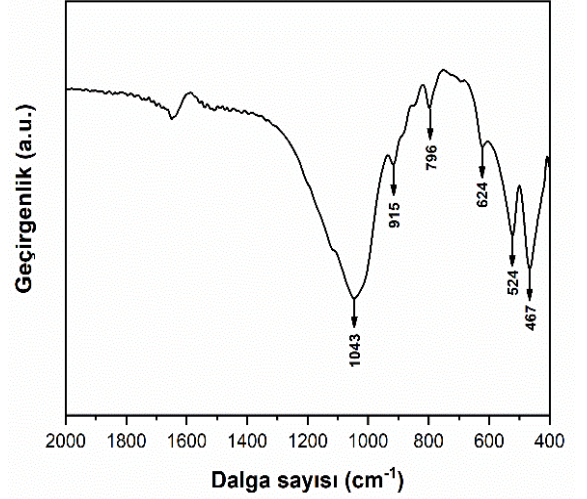
Şekil 2. Bentonite ait XRD kırınım deseni

Zeolit ve Bentonitin fonksiyonel gruplarını değerlendirmek için FTIR kullanılmıştır (Şekil 3 ve 4). Şekil 3’te verilen Zeolite ait FTIR spektrumunda $1000-1100\text{ cm}^{-1}$ ’deki karakteristik bant Si-O-Si yapısının Si-O gerilmesini göstermektedir. 461 ve 553 cm^{-1} ’deki karakteristik pikler ise sırasıyla tetrahedral yapıdaki Si-O veya Al-O eğilme, çift halka eğilmelerini göstermektedir. Elde edilen piklerin literatürde yapılan çalışmalarla uyumlu olduğu görülmüştür [43, 44].



Şekil 3. Zeolit ait FT-IR spektrumu

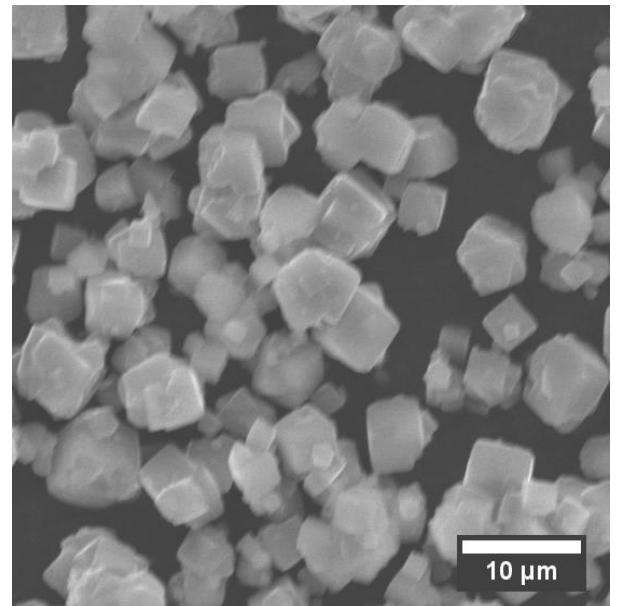
Bentonite ait adsorpsiyon bantları ve ilgili kimyasal fonksiyonel gruplar Şekil 4’te verilmiştir. 1001 , 915 ve 796 cm^{-1} ’deki pikler sırasıyla Si-O, Al-Al-OH ve Al-Mg-OH titreşimlerine karşılık gelmektedir. 524 ve 467 cm^{-1} ’deki bantlar sırasıyla Si-O-Si ve Al-O-Si eğilmelerini göstermektedir. 618 cm^{-1} ’deki bant, birleşik Al-O ve Si-O düzlem dışı titreşimlere karşılık geldiği görülmüştür. Spektrumda görülen titreşimlerin yapılan çalışmalar tarafından desteklendiği görülmektedir [45, 46].



Şekil 4. Bentonite ait FT-IR spektrumu

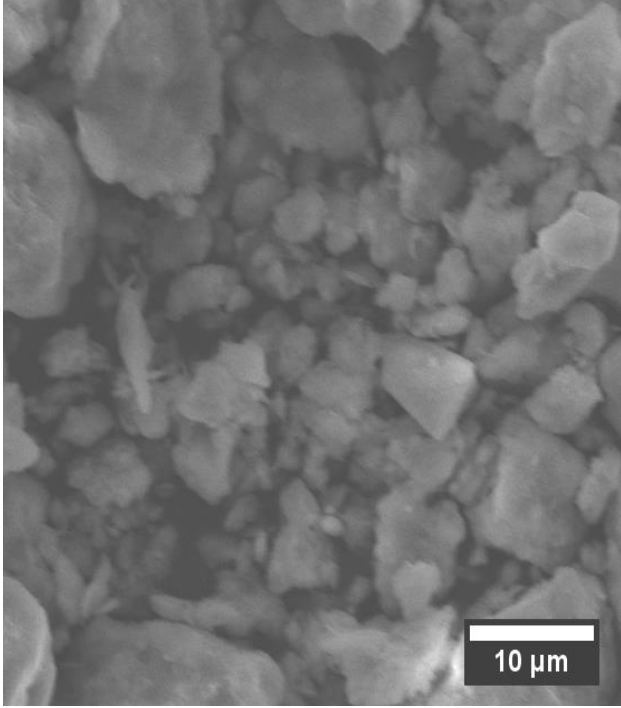
3.2 Morfolojik analiz

Zeolit ve bentonitin morfolojik özellikleri FESEM ile analiz edilmiş olup Şekil 5 ve 6’da verilmektedir. Zeolite ait FESEM analizi sonucu elde edilen görüntülerde homojen tanelere sahip olduğu görülmektedir (Şekil 5). Tanelerin tetrahedral kristal yapısına sahip olduğu ve XRD sonucunu destekler niteliktedir.



Şekil 5. Zeolit ait FESEM görüntüsü

Bentonite ait FESEM görüntüleri Şekil 6’da verilmiştir. Yapılan incelemede Bentonitin irili ve ufaklı tanelere sahip bir kil mineralinden oluştuğu görülmüştür. Yapısının irili ve karmaşık istiflenmiş tanelerden oluştuğu ve tanelerin plaka benzeri yüzey morfolojilerinden meydana gelmiştir.



Şekil 6. Bentonite ait FESEM görüntüsü

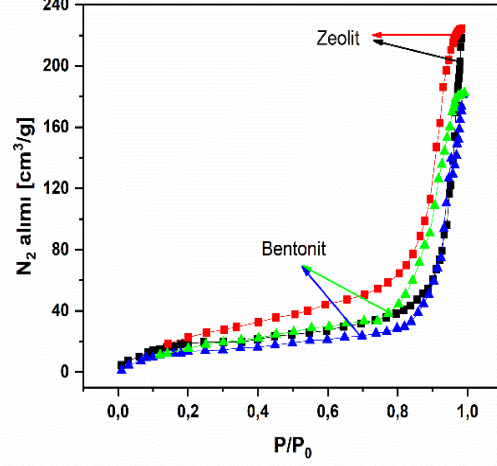
Tablo 2, EDS ile analiz edilen zeolit ve bentonit numunelerinin kimyasal bileşimini listelemektedir. Zeolit ve bentonitin kimyasal bileşimlerinin benzer şekilde silika ve alüminadan oluştuğu görülmektedir. Ayrıca EDS sonucu elde edilen verilerin XRF sonuçları ile tamamen örtüşmektedir. Zeolitin kimyasal yapısında bentonitten farklı olarak demir, magnezyum ve kalsiyum oksitinin daha yüksek olduğu görülmüştür.

Tablo 2. Zeolit ve Bentonite ait SEM-EDX analizi

Numuneler	Elementel bileşim (Atomca %)						
	Si	Al	O	Na	Mg	Fe	Ca
Zeolit	10.7	8.6	71.6	7.8	0.7	0.1	0.2
Bentonit	19.5	4.2	72.6	2.1	1.1	-	0.4

Şekil 7’de gösterildiği gibi doğal zeolit ve bentonitin, gözenekli malzemelerinin tipik bir özelliği olan H₃ tipi histerezis döngüsüne sahip tip II N₂ adsorpsiyon-desorpsiyon izoterm özelliği göstermişlerdir. Bu histerezis döngüsü, mezogözeneklerde yoğunlaşmanın meydana geldiğini göstermektedir [47]. BET analizi yapılan numunelerin dokusal özellikleri Tablo 3’te verilmiştir. Doğal zeolitin BET yüzey alanının 125,23 m²/g olduğu ve doğal bentonitin ise 53,79 m²/g gibi düşük bir BET yüzey alanına

sahip olduğu görülmüştür. Bu durumun Şekil 3 ve 4’te verilen FESEM görüntülerinde yüksek BET yüzey alanına sahip Zeolitin tek tip parçacıklardan oluşmasıdır [4, 48].



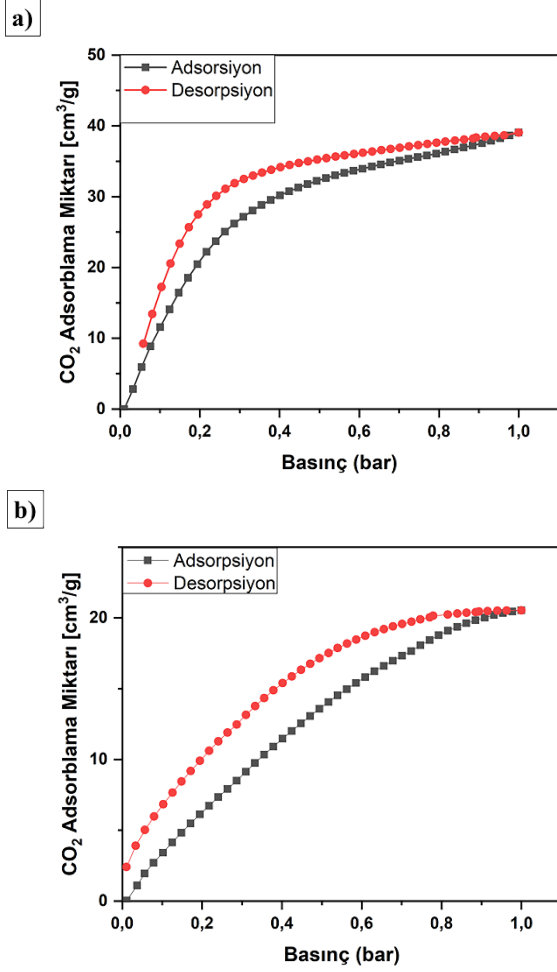
Şekil 7. Zeolit ve bentonite ait N₂ adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi

Tablo 3. Zeolit ve bentonit numunelerine ait dokusal özellikler

Parametreler	Numuneler	
	Doğal Zeolit	Doğal Bentonit
BET yüzey alanı (m ² /g)	125.23	53.79
Ortalama gözenek boyutu (nm)	3.27	12.81
Pore volume(cm ³ /g)	0.24	0.32

3.3 Zeolit ve Bentonite ait CO₂ tutum çalışması

Zeolit ve bentonite ait CO₂ adsorpsiyon izotermi Şekil 8’de görülmektedir. Doğal zeolit, 25 °C sıcaklıkta ve 1 bar basınç altında 38,7 mg/g CO₂ alımı sergilemiştir (Şekil 8(a)). Doğal bentonit tarafından 25 °C sıcaklıkta ve 1 bar basınç altında 20,53 mg/g CO₂ adsorbe edilmiştir. Zeolit tarafından adsorbe edilen yüksek CO₂ miktarı, CO₂’teki kalıcı kuadropollerle etkileşime giren ve boşluklarda yük dengeleyici katyonlara sahip gözenekli yapısına bağlanmaktadır [15]. Zeolitin bentonite göre daha yüksek CO₂ tutumu, Tablo 1 ve 2’de verilen daha yüksek Na⁺ iyonlarına ve Tablo 3’te verilen daha yüksek BET yüzey alanı/gözenek hacmine bağlanmıştır. CO₂ tutumunda kullanılan adsorbanların adsorpsiyon kapasiteleri incelendiğinde, bu çalışmadaki Zeolit ve Bentonit örneklerinin CO₂ yakalama kapasiteleri literatürde bildirilen diğer mezogözenekli adsorbanlara yakın ve bazılardan daha yüksek olduğu görülmektedir [19, 49-54]. Venaruzzo ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada bentonit clay mineralinin CO₂ tutum miktarı 3,78 mg/g olarak elde edilmiştir [53]. Xu ve arkadaşları polimer ile modifiye edilmiş zeolitin 77.6 mg/g CO₂ absorpladığını rapor etmişlerdir [55].



Şekil 8. 25 °C'deki CO₂ adsorpsiyon-desorpsiyon izotermeleri; (a) Zeolit ve (b) Bentonit

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, CO₂'nin tutunumu ve CO₂ emisyonlarını azaltmak için alternatif yöntemlerden biri olan adsorpsiyon yöntemi ile doğal zeolit ve bentonit adsorbanları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zeolit ve Bentonit malzemeleri herhangi bir işleme tabi tutulmadan kullanılmıştır.

- Kullanılan zeolit ve bentonit adsorbanlarının sırasıyla, 125,23 ve 53,79 m²/g BET yüzey alanı ile oldukça kristal mikro gözenekli bir yapıya sahip oldukları görülmüştür.
- Yüksek yüzey alanına sahip zeolit malzemesi 38,7 mg/g CO₂ yakalama kapasitesi göstermiştir.
- Her iki adsorban malzeme de hızlı adsorpsiyon kinetiği ve kararlı CO₂ adsorpsiyon-desorpsiyon geri dönüşüm performansı göstermiştir.
- Zeolit ve bentonitin düşük maliyeti, yüksek bulunabilirliği ve yüksek CO₂ yakalama performansı gelecekte bu malzemelerin kimyasal malzemeler yerine kullanılabileceğini göstermektedir.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %16

Kaynaklar

- [1] T. H. Pham, B. K. Lee, J. Kim and C. H. Lee, Enhancement of CO₂ capture by using synthesized nano-zeolite, Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 64, 220-226, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.04.026>.
- [2] G. Song, X. Zhu, R. Chen, Q. Liao, Y. D. Ding and L. Chen, An investigation of CO₂ adsorption kinetics on porous magnesium oxide, Chemical Engineering Journal, 283, 175-183, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.07.055>.
- [3] J. D. Figueroa, T. Fout, S. Plasynski, H. McIlvried and R. D. Srivastava, Advances in CO₂ capture technology—the US Department of Energy's Carbon Sequestration Program, International journal of greenhouse gas control, 2, 9-20, 2008. [https://doi.org/10.1016/S1750-5836\(07\)00094-1](https://doi.org/10.1016/S1750-5836(07)00094-1).
- [4] S. Cavenati, C. A. Grande and A. E. Rodrigues, Adsorption equilibrium of methane, carbon dioxide, and nitrogen on zeolite 13X at high pressures, Journal of Chemical & Engineering Data, 49, 1095-1101, 2004. <https://doi.org/10.1021/je0498917>.
- [5] R. S. Haszeldine, Carbon capture and storage: how green can black be?, Science, 325, 1647-1652, 2009. <https://doi.org/10.1126/science.1172246>.
- [6] S. Choi, J. H. Drese and C. W. Jones, Adsorbent materials for carbon dioxide capture from large anthropogenic point sources, ChemSusChem: Chemistry & Sustainability Energy & Materials, 2, 796-854, 2009. <https://doi.org/10.1002/cssc.200900036>.
- [7] D. Ko, H. A. Patel and C. T. Yavuz, Synthesis of nanoporous 1, 2, 4-oxadiazole networks with high CO₂ capture capacity, Chemical Communications, 51, 2915-2917, 2015. <https://doi.org/10.1039/C4CC08649J>.
- [8] E. Díaz, E. Muñoz, A. Vega and S. Ordóñez, Enhancement of the CO₂ retention capacity of X zeolites by Na-and Cs-treatments, Chemosphere, 70, 1375-1382, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.09.034>.
- [9] E. Díaz, E. Munoz, A. Vega and S. Ordóñez, Enhancement of the CO₂ retention capacity of Y zeolites by Na and Cs treatments: effect of adsorption temperature and water treatment, Industrial & engineering chemistry research, 47, 412-418, 2008. <https://doi.org/10.1021/ie070685c>.
- [10] G. T. Rochelle, Amine scrubbing for CO₂ capture, Science, 325, 1652-1654, 2009. <https://doi.org/10.1126/science.117673>.
- [11] S. Zulfıkar, M. I. Sarwar and C. T. Yavuz, Melamine based porous organic amide polymers for CO₂ capture, RSC advances, 4, 52263-52269, 2014. <https://doi.org/10.1039/C4RA11442F>.
- [12] H. A. Patel, F. Karadas, A. Canlier, J. Park, E. Deniz, Y. Jung, M. Atılhan and C. T. Yavuz, High capacity carbon dioxide adsorption by inexpensive covalent

- organic polymers, *Journal of Materials Chemistry*, 22, 8431-8437, 2012. <https://doi.org/10.1039/C2JM30761H>.
- [13] Z. Liang, M. Marshall and A. L. Chaffee, CO₂ adsorption-based separation by metal organic framework (Cu-BTC) versus zeolite (13X), *Energy & Fuels*, 23, 2785-2789, 2009. <https://doi.org/10.1021/ef800938e>.
- [14] J. Dunne, M. Rao, S. Sircar, R. Gorte and A. Myers, Calorimetric heats of adsorption and adsorption isotherms. 2. O₂, N₂, Ar, CO₂, CH₄, C₂H₆, and SF₆ on NaX, H-ZSM-5, and Na-ZSM-5 zeolites, *Langmuir*, 12, 5896-5904, 1996. <https://doi.org/10.1021/la960496r>.
- [15] S. T. Yang, J. Kim and W. S. Ahn, CO₂ adsorption over ion-exchanged zeolite beta with alkali and alkaline earth metal ions, *Microporous and Mesoporous Materials*, 135, 90-94, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2010.06.015>.
- [16] F. Banat, B. Al-Bashir, S. Al-Asheh, O. Hayajneh, Adsorption of phenol by bentonite, *Environmental pollution*, 107, 391-398, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00173-6](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00173-6).
- [17] G. Bereket, A. Z. Arog and M. Z. Özel, Removal of Pb (II), Cd (II), Cu (II), and Zn (II) from aqueous solutions by adsorption on bentonite, *Journal of Colloid and interface science*, 187, 338-343 (1997) <https://doi.org/10.1006/jcis.1996.4537>.
- [18] R. J. Hook, An investigation of some sterically hindered amines as potential carbon dioxide scrubbing compounds, *Industrial & engineering chemistry research*, 36, 1779-1790, 1997. <https://doi.org/10.1021/ie9605589>.
- [19] C. Chen and W. S. Ahn, CO₂ capture using mesoporous alumina prepared by a sol-gel process, *Chemical Engineering Journal*, 166, 646-651, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.11.038>.
- [20] C. A. Trickett, A. Helal, B. A. Al-Maythalony, Z. H. Yamani, K. E. Cordova and O. M. Yaghi, The chemistry of metal-organic frameworks for CO₂ capture, regeneration and conversion, *Nature Reviews Materials*, 2, 1-16, 2017. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2017.45>.
- [21] M. Ding, R. W. Flaig, H. L. Jiang and O. M. Yaghi, Carbon capture and conversion using metal-organic frameworks and MOF-based materials, *Chemical Society Reviews*, 48, 2783-2828, 2019. <https://doi.org/10.1039/C8CS00829A>.
- [22] M. S. Atas, S. Dursun, H. Akyildiz, M. Citir, C. T. Yavuz and M. S. Yavuz, Selective removal of cationic micro-pollutants using disulfide-linked network structures, *RSC advances*, 7, 25969-25977, 2017. <https://doi.org/10.1039/C7RA04775D>.
- [23] G. P. Hao, W. C. Li, D. Qian and A. H. Lu, Rapid synthesis of nitrogen-doped porous carbon monolith for CO₂ capture, *Advanced materials*, 22, 853-857, 2010. <https://doi.org/10.1002/adma.200903765>.
- [24] O. A. Yildirim and M. S. Atas, Synthesis and characterization of spherical FeNi₃ metallic nanoparticles based on sodium dodecyl sulfate, *Journal of Materials and Manufacturing*, 1, 33-40, 2022. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7472367>.
- [25] M. Ş. Atas and Ö. A. Yildirim, Ni-FeNi₃-Fe₃O₄ metalik nanoalaşimların hidrotermal yöntemle sentezi ve karakterizasyonu, *Konya Journal of Engineering Sciences*, 10, 965-975, 2022. <https://doi.org/10.36306/konjes.1148331>.
- [26] M. A. Topçu, Production and characterization of zinc oxide nanofibers derived from waste material as precursor, *Process Safety and Environmental Protection*, 175, 150-159, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.05.035>.
- [27] S. Yang, L. Zhan, X. Xu, Y. Wang, L. Ling and X. Feng, Graphene-based porous silica sheets impregnated with polyethyleneimine for superior CO₂ capture, *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.)*, 25, 2130-2134, 2013. <https://doi.org/10.1002/adma.201204427>.
- [28] A. Kaya and S. Durukan, Utilization of bentonite-embedded zeolite as clay liner, *Applied Clay Science*, 25, 83-91, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2003.07.002>.
- [29] M. Trckova, L. Matlova, L. Dvorska and I. Pavlik, Kaolin, bentonite, and zeolites as feed supplements for animals: health advantages and risks, *Veterinární Medicína*, 49, 389-399, 2004. <https://doi.org/10.17221/5728-VETMED>.
- [30] S. Ghaffari, M. F. Gutierrez, A. Seidel-Morgenstern, H. Lorenz and P. Schulze, Sodium Hydroxide-Based CO₂ Direct Air Capture for Soda Ash Production—Fundamentals for Process Engineering, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62, 7566-7579, 2023. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c00357>.
- [31] S. Kumar, R. Srivastava and J. Koh, Utilization of zeolites as CO₂ capturing agents: Advances and future perspectives, *Journal of CO₂ Utilization*, 41, 101251, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101251>.
- [32] C. Chen, D. W. Park and W. S. Ahn, CO₂ capture using zeolite 13X prepared from bentonite, *Applied Surface Science*, 292, 63-67, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.11.064>.
- [33] F. Wang, C. Gunathilake and M. Jaroniec, Development of mesoporous magnesium oxide-alumina composites for CO₂ capture, *Journal of CO₂ Utilization*, 13, 114-118, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2015.11.001>.
- [34] Y. Xia, R. Mokaya, G. S. Walker and Y. Zhu, Superior CO₂ adsorption capacity on N-doped, high-surface-area, microporous carbons templated from zeolite, *Advanced Energy Materials*, 1, 678-683, 2011. <https://doi.org/10.1002/aenm.201100061>.
- [35] V. Garshasbi, M. Jahangiri and M. Anbia, Equilibrium CO₂ adsorption on zeolite 13X prepared from natural clays, *Applied Surface Science*, 393, 225-233, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.09.161>.
- [36] H. Aysan, S. Edebali, C. Ozdemir, M. Celik Karakaya and N. Karakaya, Use of chabazite, a naturally abundant zeolite, for the investigation of the adsorption

- kinetics and mechanism of methylene blue dye, *Microporous and Mesoporous Materials*, 235, 78-86, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2016.08.007>.
- [37] L. Cao, Z. Li, S. Xiang, Z. Huang, R. Ruan and Y. Liu, Preparation and characteristics of bentonite-zeolite adsorbent and its application in swine wastewater, *Bioresource Technology*, 284, 448-455, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.043>.
- [38] P. Murge, S. Dinda and S. Roy, Zeolite-Based Sorbent for CO₂ Capture: Preparation and Performance Evaluation, *Langmuir*, 35, 14751-14760, 2019. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b02259>.
- [39] N. Kuanchertchoo, R. Suwanpreedee, S. Kulprathipanja, P. Aungkavattana, D. Atong, K. Hemra, T. Rirksomboon and S. Wongkasemjit, Effects of synthesis parameters on zeolite membrane formation and performance by microwave technique, *Applied Organometallic Chemistry*, 21, 841-848, 2007. <https://doi.org/10.1002/aoc.1295>.
- [40] R. Vinodh, C. Deviprasath, C. V. M. Gopi, V. G. R. Kummara, R. Atchudan, T. Ahamad, H. J. Kim and M. Yi, Novel 13X Zeolite/PANI electrocatalyst for hydrogen and oxygen evolution reaction, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 28337-28349, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.194>.
- [41] R. S. Hebbar, A. M. Isloor, B. Prabhu, Inamuddin, A. M. Asiri and A. Ismail, Removal of metal ions and humic acids through polyetherimide membrane with grafted bentonite clay, *Scientific reports*, 8, 4665, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22837-1>.
- [42] M. A. Salam, M. R. Abukhadra and A. Adlii, Insight into the adsorption and photocatalytic behaviors of an organo-bentonite/Co₃O₄ green nanocomposite for malachite green synthetic dye and Cr (VI) metal ions: application and mechanisms, *ACS omega*, 5, 2766, 2020. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03411>.
- [43] E. Z. M. Tarmizi, H. Baqiah, Z. A. Talib and H. M. Kamari, Preparation and physical properties of polypyrrole/zeolite composites, *Results in Physics*, 11, 793-800, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.09.043>.
- [44] W. Wang, Q. Feng, K. Liu, G. Zhang, J. Liu and Y. Huang, A novel magnetic 4A zeolite adsorbent synthesised from kaolinite type pyrite cinder (KTPC), *Solid State Sciences*, 39, 52-58, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2014.11.012>.
- [45] A. Kassim, H. E. Mahmud and F. Adzmi, Polypyrrole-montmorillonite clay composites: an organic semiconductor, *Materials science in semiconductor processing*, 10, 246-251, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2008.02.001>.
- [46] J. Kim, F. Liu, H. Choi, S. Hong and J. Joo, Intercalated polypyrrole/Na⁺-montmorillonite nanocomposite via an inverted emulsion pathway method, *Polymer*, 44, 289-293, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(02\)00749-8](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(02)00749-8).
- [47] C. Chen, W. J. Son, K. S. You, J. W. Ahn and W. S. Ahn, Carbon dioxide capture using amine-impregnated HMS having textural mesoporosity, *Chemical Engineering Journal*, 161, 46-52, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.04.019>.
- [48] Z. Zhang, W. Zhang, X. Chen, Q. Xia and Z. Li, Adsorption of CO₂ on zeolite 13X and activated carbon with higher surface area, *Separation Science and Technology*, 45, 710-719, 2010. <https://doi.org/10.1080/01496390903571192>.
- [49] X. Xu, C. Song, J. M. Andrésen, B.G. Miller and A.W. Scaroni, Preparation and characterization of novel CO₂ “molecular basket” adsorbents based on polymer-modified mesoporous molecular sieve MCM-41, *Microporous and mesoporous materials*, 62, 29-45, 2003. [https://doi.org/10.1016/S1387-1811\(03\)00388-3](https://doi.org/10.1016/S1387-1811(03)00388-3).
- [50] C. Chen, J. Kim, D. A. Yang and W. S. Ahn, Carbon dioxide adsorption over zeolite-like metal organic frameworks (ZMOFs) having a sod topology: Structure and ion-exchange effect, *Chemical Engineering Journal*, 168, 1134-1139, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.01.096>.
- [51] C. M. Lu, J. Liu, K. Xiao and A. T. Harris, Microwave enhanced synthesis of MOF-5 and its CO₂ capture ability at moderate temperatures across multiple capture and release cycles, *Chemical Engineering Journal*, 156, 465-470, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.10.067>.
- [52] L. Zhao, Z. Bacsik, N. Hedin, W. Wei, Y. Sun, M. Antonietti and M.M. Titirici, Carbon dioxide capture on Amine-Rich carbonaceous materials derived from glucose, *ChemSusChem*, 3, 840-845, 2010. <https://doi.org/10.1002/cssc.201000044>.
- [53] J. Venaruzzo, C. Volzone, M. Rueda and J. Ortega, Modified bentonitic clay minerals as adsorbents of CO, CO₂ and SO₂ gases, *Microporous and Mesoporous Materials*, 56, 73-80, 2002. [https://doi.org/10.1016/S1387-1811\(02\)00443-2](https://doi.org/10.1016/S1387-1811(02)00443-2).
- [54] V. Zelenák, M. Badaničová, D. Halamová, J. Čejka, A. Zukal, N. Murafa and G. Goerigk, Amine-modified ordered mesoporous silica: Effect of pore size on carbon dioxide capture, *Chemical Engineering Journal*, 144, 336-342, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.07.025>.
- [55] X. Xu, C. Song, J. M. Andrésen, B. G. Miller and A. W. Scaroni, Preparation and characterization of novel CO₂ “molecular basket” adsorbents based on polymer-modified mesoporous molecular sieve MCM-41, *Microporous and Mesoporous Materials*, 62, 29-45, 2003. [https://doi.org/10.1016/S1387-1811\(03\)00388-3](https://doi.org/10.1016/S1387-1811(03)00388-3).





29 Temmuz 2021 Mw=8.2 Chignik, Alaska Peninsula depremi deformasyonlarının bağıl konum belirleme servis sonuçları ile incelenmesi

Investigating the results of relative GNSS services with the July 29, 2021 Mw 8.2 Chignik, Alaska Peninsula earthquake

Deniz Öz Demir^{1,*}, Özge Güneş²

^{1,2} Yıldız Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34220, İstanbul, Türkiye

Öz

Bu çalışmada internet tabanlı bağıl konumlama GNSS veri değerlendirme servislerinin kullanımının IGS ağında koordinat değerleri açısından istatistiksel olarak karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, 29 Temmuz 2021'de Alaska'da Mw=8.2 büyüklüğünde gerçekleşen deprem ele alınmıştır. Depremin meydana geldiği Alaska-Aleut bölgesinde yer alan 8 IGS istasyonu seçilmiştir. Bu istasyonların deprem gününü de içeren 15 günlük zaman serileri AUSPOS ve OPUS internet tabanlı GNSS veri değerlendirme servislerinden elde edilen koordinatlar kullanılarak elde edilmiştir. Depremin gerçekleştiği noktaya yakın olan istasyonlarda yatayda 40 cm'ye; düşeyde ise 10 cm'ye varan deformasyon büyüklükleri elde edilmiştir. Her iki servisten elde edilen toposentrik koordinat bileşenlerindeki farkların dağılımı sıfır etrafında toplanırken; en büyük farklar kuzey-güney, doğu-batı ve yükseklik bileşenleri için sırasıyla yaklaşık 5 cm; 7 cm ve 2.5 cm'dir. Söz konusu bu farkların istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını belirlemek için istatistiksel test uygulanmıştır. Test sonucunda, internet tabanlı servislerden elde edilen toposentrik koordinat bileşenleri arasındaki farkların anlamsız olduğu bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: GNSS, Deprem, Bağıl konum belirleme, Doğruluk, Anlamlılık testi

1 Giriş

İnternet tabanlı Global Navigation Satellite System (GNSS) konum belirleme servisleri günümüzde klasik haritacılık çalışmalarından akademik çalışmalara kadar pek çok farklı alanda aktif olarak tercih edilmektedir. Pek çok üniversite ve organizasyon tarafından bağıl veya hassas nokta konum belirleme (Precise Point Positioning, PPP) çözüm yöntemlerini benimseyen internet tabanlı servisler kullanıma sunulmuştur. Kullanıcı dostu arayüze sahip olması, ücretsiz erişimli olarak sunulması ve güncel gelişmelere göre iyileştirilmelerin sağlanması bu servislerin avantajlarından bazılarıdır. Literatürde bahsedilen bu servisler kullanılarak yapılmış pek çok çalışma bulunmaktadır. Bunlardan en eski ve bilinenlerinin başında Ghoddousi-Fard ve Dare [1] gelmektedir. Ghoddousi-Fard ve Dare [1] seçtikleri GNSS istasyonlarının veri setlerini, bağıl konum belirleme yapan Australian Online Global

Abstract

In this study, we aimed to perform a statistical comparison of web-based relative positioning GNSS data processing services concerning coordinate values within the IGS network. To achieve this goal, we focused on the earthquake that struck Alaska on July 29, 2021, with a magnitude of Mw=8.2. We selected 8 IGS stations located in the Alaska-Aleut region, where the earthquake occurred. We used the AUSPOS and OPUS web-based GNSS data processing services to obtain 15-day time series, including the day of the earthquake. At stations near the earthquake's epicenter, we observed horizontal deformations of up to 40 cm and vertical deformations of 10 cm. The distribution of differences in the topocentric coordinate components obtained from both services predominantly centered around zero. However, the substantial differences were approximately 5 cm for the north-south component, 7 cm for the east-west component, and 2.5 cm for the height component. To assess the statistical significance of these differences, we conducted a statistical test. The test results indicate that the differences in the topocentric coordinate components obtained from web-based services are not statistically significant.

Keywords: GNSS, Earthquake, Relative point positioning, Accuracy, Significance test

Positioning System Processing Service (AUSPOS), Scripps Coordinate Update Tool (SCOUT), Online Positioning User Service (OPUS) ile PPP çözümü yapan Canadian Spatial Reference System-Precise Point Positioning (CSRS-PPP) ve Auto-GIPSY servisleri ile analiz etmişlerdir. Çift frekanslı alıcıdan elde edilmiş 10 saatten daha uzun veri seti ile kullandıkları tüm servislerden benzer sonuçlar elde ettiklerini ifade etmişlerdir. Ebner ve Featherstone [2] Güneybatı Avustralya'da bulunan 40'tan fazla GNSS noktasından oluşan veri setini, PPP çözümü yapan CSRS-PPP servisinden ve bağıl çözüm yapan Bernese akademik bir yazılımından elde ettiği sonuçları istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. Tsakiri [3]'de hem bağıl hem de PPP yöntemine göre çözüm yapan servislerin doğruluğu gözlem süresine göre karşılaştırılmıştır. Devam eden yıllardan günümüze kadar pek çok çalışma literatürde yer almıştır. Bu çalışmaların bir kısmı El-Mowafy [4], Wang ve Soler [5],

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: denizoz@yildiz.edu.tr (D. Öz Demir)

Geliş / Received: 07.11.2023 Kabul / Accepted: 06.02.2024 Yayımlanma / Published: 15.04.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1387411

Öcalan vd. [6], EL-Hattab [7], Dawidowicz ve Krzan [8], Guo [9], Alkan vd. [10], Yiğit vd. [11], Alçay ve İmren [12], Jamieson ve Gillins [13], Aydın vd. [14], Şimşek vd. [15], Gökdaş ve Özlüdemir [16], İnal vd. [17], Güneş ve Demir [18] ve Gümüş vd. [19] olarak sıralanabilmektedir.

Çalışmalarda çoğunlukla en uygun koşullarda elde edilen GNSS verileri analiz edilmiş ve servislerden elde edilen koordinat farkları karşılaştırılmıştır. Burada en uygun koşul ile iyonosferik etkinin en az olduğu, tektonik hareketliliğin olmadığı dolayısıyla sonuçların dış faktörlerden çok fazla etkilenmeyeceği durumlar ifade edilmek istenmektedir [18]. Bu çalışmada ise ideal olmayan koşul olarak tanımlanabilecek bir deprem örneği üzerinde, bağıl konum belirleme servislerinin kullanımının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Alaska'da bulunan 8 International GNSS Service (IGS) istasyonundan oluşan ağda, 2021 yılında Mw=8.2 büyüklüğünde meydana gelen depremi de kapsayan 15 günlük veri seti AUSPOS ve OPUS servisleri kullanılarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar arasındaki farkların anlamlılığı istatistiksel açıdan ele alınmıştır. Çalışma, veri setinin ve kullanılan internet tabanlı servislerin tanıtıldığı Materyal ve Metot; analizlerin gerçekleştirildiği ve bulguların tartışıldığı Bulgular ve tartışma ile devam etmekte ve Sonuçlar başlığı ile tamamlanmaktadır.

2 Materyal ve metot

GNSS gözlemleri ile konum belirleme çalışmalarında uygulanan klasik yöntemlerden biri bağıl konum belirlemedir. Bağıl konum belirleme, akademik yazılımlarla ile yapılabildiği gibi internet tabanlı yazılımlar ile de kolayca gerçekleştirilebilmektedir (AUSPOS, OPUS ve SCOUT bu amaçla kullanılan en bilinen servislerdendir). Bağıl konum belirlemede çözümün yapılabilmesi için öncelikli olarak yeterli referans nokta kümesine ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca iyonosferik ve atmosferik modellemeler, hassas yörünge bilgileri ve saat hataları gibi farklı hata kaynaklarını elimine etmek için çeşitli modeller kullanılmaktadır. Akademik yazılımlar ile analizler gerçekleştirilirken bahsedilen bu aşamaların tümü kullanıcı tarafından belirlenebilirken; internet tabanlı servisler ile yapılan analizlerde genellikle sadece gözlem dosyasının sisteme yüklenmesi yeterli olmaktadır. Servisler kendi algoritmalarına göre hata kaynaklarını elimine etmek için farklı modeller uygulamakta ve referans nokta kümesini de analiz edilecek noktaya göre seçmektedir. Aşağıda bu çalışma kapsamında kullanılan AUSPOS ve OPUS servislerinin çalışma prensibi hakkında bilgi verilmektedir.

• AUSPOS

AUSPOS, Geoscience Australia tarafından sağlanan ücretsiz bir internet tabanlı Global Positioning System (GPS) veri işleme servsidir [20]. Analizler arka planda Bernese v5.2 [21] akademik yazılımında gerçekleştirilmekte, IGS istasyonlarından ve ürünlerinden faydalanılmaktadır. Kullanıcılardan sadece çift frekanslı alıcılar tarafından statik olarak toplanan GPS gözlemlerinin Receiver Independent Exchange Format (RINEX) dosya formatında sisteme yüklenmesi istenmektedir. Ağ çözümünde referans olarak kullanılacak istasyonların seçimi servis tarafından otomatik olarak yapılmakta, kullanıcıya seçim hakkı

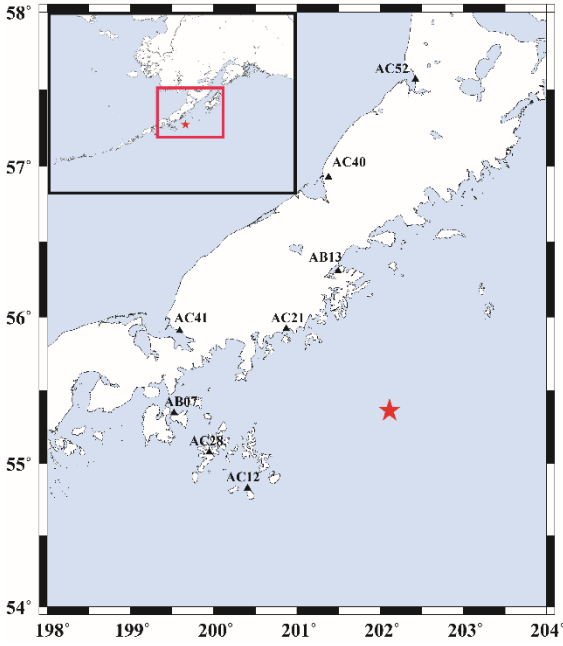
sunulmamaktadır. Referans nokta kümesinin seçilmesinde, analizi yapılacak noktaya en yakın 15 IGS ve Asia-Pacific Reference Frame (APREF) noktası seçilmekte ve veri setleri Geoscience Australia GNSS veri arşivinden temin edilmektedir. Daha sonra bu istasyonlar kullanılarak ikili fark alma tekniği kullanılarak bağıl çözüm, Bernese v5.2 yazılımında tamamlanmaktadır.

Verilerin değerlendirilmesinde hassas IGS14 yörünge bilgilerinin yanı sıra, iyonosferik modellemede L1 ve L2 frekanslarının iyonosfer içermeyen lineer kombinasyonu oluşturularak birinci dereceden etki ortadan kaldırılmaktadır. İkinci ve üçüncü dereceden iyonosferik düzeltmeler de uygulanmaktadır. Islak ve kuru troposferik düzeltmeler için de Global Mapping Function (GMF) fonksiyonu kullanılmaktadır. Değerlendirme sonuçları kullanıcılara e-posta aracılığıyla iletilmektedir. İletilen sonuç raporunda, referans olarak kullanılan istasyon bilgileri ve analiz sonuçları International Terrestrial Reference Frame 2014 (ITRF14) referans sisteminde kartezyen, coğrafi ve Universal Transverse Mercator (UTM) koordinatlar ile sağlanmaktadır. Sonuçların güvenilirliği %95 olasılık ile sadece coğrafi koordinatlar için verilmektedir.

• OPUS

OPUS, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)'ya bağlı National Geodetic Survey (NGS) tarafından yürütülen ücretsiz internet tabanlı GPS veri değerlendirme servsidir [22]. Sadece çift frekanslı alıcılardan toplanan GPS gözlemlerinin işlendiği serviste kullanıcılara hem statik hem de hızlı-statik analiz yapma seçeneği sunulmaktadır. Statik değerlendirmeler için arka planda Program for Adjustment of GPS Ephemerides (PAGES) yazılımı kullanılmaktadır [23]. İkili fark yöntemine göre yapılan bağıl değerlendirmede L1 ve L2'nin iyonosfer içermeyen lineer kombinasyonu oluşturularak birinci dereceden etki ortadan kaldırılmaktadır. Islak ve kuru troposferik düzeltmeler için Niell Mapping Function (NMF) [24] fonksiyonu kullanılmaktadır. Referans nokta seçimi analizi yapılacak noktaya en yakın IGS istasyonlarından (genellikle 3 istasyon) seçilmektedir. Değerlendirmelerin yapılabilmesi için kullanıcılar tarafından RINEX formatında dosyaları sisteme yüklemesi, anten tipi ve yüksekliği bilgisinin girilmesi yeterlidir. Sadece, Amerika'da bulunan noktaların analizinde referans nokta seçiminde kullanılacak ya da kullanılmayacak IGS noktası bilgi girişi kullanıcı seçimine de sunulmaktadır. Sonuç koordinatlar, üç bağımsız baz çözümünün ortalaması olarak elde edilmekte ve e-posta aracılığıyla kullanıcılara gönderilmektedir. Sonuç dosyasında North American Datum of 1983 (NAD83) ve ITRF14 referans sisteminde kartezyen ve coğrafi koordinatlar standart sapma bilgileri ile yer almaktadır. Bunların dışında UTM koordinatları ile referans olarak seçilen noktaların bilgisi de gönderilmektedir.

Bu çalışmada AUSPOS ve OPUS servisleri kullanılarak 2021-07-29 06:15:49 (UTC) tarihinde 35.0 km derinlikte, Mw=8.2 büyüklüğünde Alaska'da (55.364°N 157.888°W) [25] meydana gelen depreme ait 8 adet GPS istasyonunun verileri kullanılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Çalışmada alanı (Kırmızı yıldız depremin odak noktasını göstermektedir.)

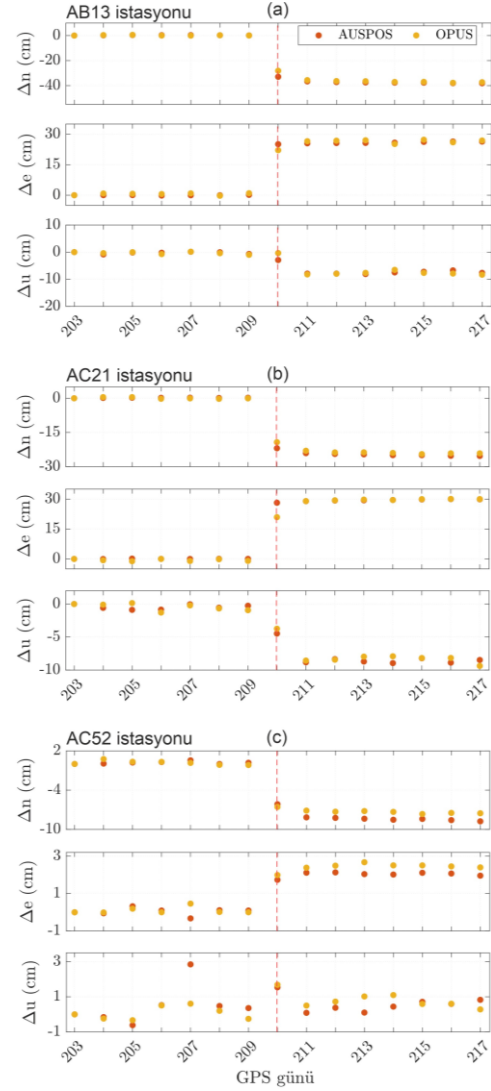
United States Geological Survey (USGS) internet sitesinden alınan bilgiye göre, Alaska yarımadasının güneyinde meydana gelen deprem Pasifik ve Kuzey Amerika levhası arasındaki dalma zonu arayüzünde veya yakınında bindirme bir faylanmanın sonucu olarak meydana gelmiştir. 1900'lerden günümüze 29 Temmuz 2021 depreminin 250 km yakınındaki Alaska-Aleut dalma bölgesinde büyüklüğü (M_w) 7'den fazla 8 farklı deprem daha meydana gelmiştir. Bunlardan en yakın tarihli olan iki deprem, 22 Temmuz ve 19 Ekim 2020'de gerçekleşen $M_w=7.8$ ve $M_w=7.6$ büyüklüğünde meydana gelenlerdir. 29 Temmuz 2021 depreminin 62 km ve 145 km batısında gerçekleşen 2020 depremleri 2021 depremin habercisi olarak görülmüştür. 10 Kasım 1938'de de 29 Temmuz 2021 depreminin 40 km yakınlarında $M_w=8.2$ büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir [25]. 29 Temmuz 2021 depreminin, 1938 depreminin kırık bölgesini kısmen veya tamamen kırıştılabileceği de yer alan bilgiler arasındadır [25-26].

Şekil 1'de görüldüğü üzere, seçilen istasyonlar depremin meydana geldiği bölgede yer almaktadır. Deprem sonucu meydana gelen deformasyonun net bir şekilde belirlenebilmesi için deprem öncesi, deprem anı ve deprem sonrası zaman dilimlerini de içeren 22.07.2021-05.08.2021 tarihleri arasında 15 günlük bir veri seti seçilmiştir. Buna göre, istasyonlara ait zaman serileri oluşturulmuştur. Her bir IGS istasyonu verisi hem AUSPOS hem de OPUS servislerinde tüm günler için değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonuçları Bulgular ve tartışma bölümünde verilmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

AUSPOS ve OPUS servisleri aracılığıyla yapılan değerlendirmeler, sadece GPS uydularının dikkate alındığı ITRF14 referans sisteminde ve ölçü epöğünde gerçekleştirilmiştir. AUSPOS, 14 farklı istasyonu geniş bir

alanda seçerken, OPUS en yakındaki 3 istasyonu referans olarak seçmiştir. İnternet tabanlı servislerden elde edilen kartezyen koordinatlar, depremden kaynaklı meydana gelen deformasyonların daha iyi gözlenebilmesi için toposentrik (Δn /kuzey-güney; Δe /doğu-batı ve Δu /yükseklik) koordinat sistemine dönüştürülmüştür. AUSPOS ve OPUS zaman serilerinin tüm koordinat bileşenlerinde benzer özellikte olduğu görülmüştür. Şekil 2'de, AB13, AC21 ve AC52 IGS istasyonlarının zaman serileri örnek olarak verilmektedir.



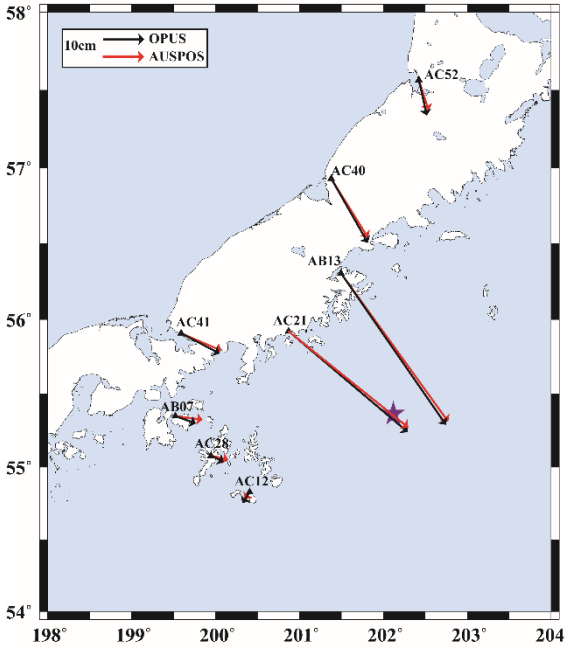
Şekil 2. AUSPOS ve OPUS servislerinden elde edilen yerel koordinatlar zaman serisi (a) AB13, (b) AC21 ve (c) AC52 IGS istasyonları (Kırmızı kesikli çizgi depremi göstermektedir.)

AB13 ve AC21 depremin odak noktasına en yakın istasyonlardan ikisidir. Şekil 2a'da AB13'ün zaman serisi incelendiğinde AUSPOS ve OPUS servislerinin depremin meydana geldiği gün, koordinat bileşenlerinde meydana gelen sıçramaları yakaladığı görülmektedir. AB13 istasyonunda servislerden elde edilen koordinat bileşenleri arasındaki en büyük fark kuzey-güney bileşeninde yaklaşık 5 cm olarak elde edilmiştir. Yatay koordinat bileşenlerinde,

düşey bileşene göre daha fazla değişimin olduğu belirlenmiştir.

Şekil 2b’de AC21 noktasının zaman serisine bakıldığında, yatay koordinat bileşenlerdeki yer değiştirmenin düşey bileşene göre daha büyük olduğu görülmektedir. Doğu-batı koordinat bileşeninde, kullanılan veri değerlendirme servislerinden elde edilen koordinat değerleri arasında yaklaşık 7 cm’lik bir fark olduğu görülmektedir. Depreme en uzak istasyonlardan biri olan AC52’de ise diğer noktalara göre daha az deformasyon meydana geldiği ve servislerden elde edilen sonuçlar arasındaki farkların en fazla yaklaşık 2 cm ile düşey bileşende olduğu elde edilmiştir.

İnternet tabanlı servisler ile yapılan değerlendirmeler sonucunda elde edilen yerel koordinatlar ile toplam deformasyon büyüklükleri hesaplanmıştır. En büyük yer değiştirmenin AB13 istasyonunda meydana geldiği ve yatay bileşende 40 cm’ye düşeyde ise 10 cm’ye varan deformasyon büyüklüklerinin olduğu görülmüştür (Şekil 3).

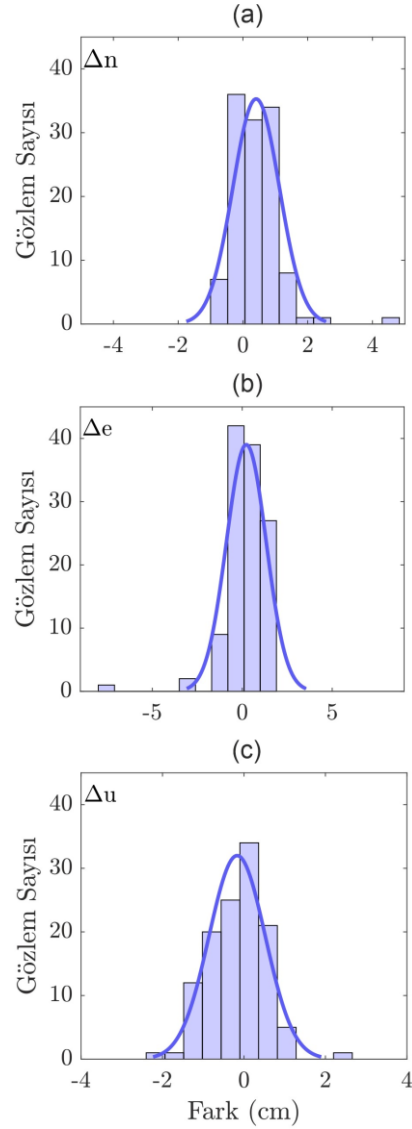


Şekil 3. OPUS ve AUSPOS servislerinden elde edilen deformasyon büyüklükleri

Liu vd. [27] içerisinde AB13 IGS istasyonunun da bulunduğu bir ağ ile analizler gerçekleştirmiştir. GNSS değerlendirmelerinin CSRS-PPP ile yapıldığı çalışma ile deformasyon büyüklüklerinin uyumlu olduğu söylenebilmektedir. AB13 istasyonundan sonra en büyük deformasyon, AC21’de meydana gelmiştir. Yatayda 30 cm, düşeyde ise yine 10 cm’ye varan yer değiştirmeler burada da gerçekleşmiştir. Depremi odak noktasından uzaklaştıkça ise deformasyonların azaldığı görülmektedir.

İnternet tabanlı servislerden elde edilen yerel koordinat bileşenleri arasındaki farklar, tüm istasyonlardaki zaman serileri için birlikte ele alınmış ve 120 gözlem (8 istasyon için 15’er günlük verileri) oluşmuştur. Elde edilen farkların dağılımı Şekil 4a, 4b ve 4c’de sırasıyla kuzey-güney, doğu-batı ve yükseklik bileşenleri için verilmektedir. Tüm

koordinat bileşenlerinde internet tabanlı servisler arasındaki farklar sıfır değeri etrafında toplanmaktadır ve normal dağılımla uyumludur. Yatay koordinat bileşeninde görülen en büyük farklılıklar AB13 ve AC21 istasyonlarında deprem gününde meydana gelen sıçramalardan dolayı meydana gelmektedir.



Şekil 4. AUSPOS ve OPUS servislerinden elde edilen yerel koordinatlar arasındaki farkların dağılımı (a, b ve c sırasıyla Δn , Δe ve Δu bileşenlerine ait fark grafiklerini göstermektedir.)

Histogramlardan elde edilen normal dağılım, servisler arasında meydana gelen farklılıkların anlamsız olduğunu ifade etmektedir. Ancak AUSPOS ve OPUS servislerinden elde edilen sonuçlar, ortalama değerleri ve varyansları farklı olan iki bağımsız popülasyonu temsil etmektedir. Servisler arasındaki en önemli ayırım Materyal ve Yöntem bölümünde açıklandığı üzere, AUSPOS servisinden gelen sonuçlarda kartezyen koordinatlara ait standart sapma bilgisinin olmamasıdır. Bu nedenle, servisler arasındaki farkların istatistiksel olarak da açıklanabilmesi için varyansların

bilinmediği ve eşit olmadığı duruma uygun olan bir istatistiksel test yapılmıştır. İlk olarak, iki farklı popülasyona ait μ_1 ve μ_2 değerlerinin eşit olmadığını savunan $H_0 : \mu_1 - \mu_2 = d_0$ hipotezi kurulmuştur. Burada μ_1 ve μ_2 sırasıyla OPUS ve AUSPOS servislerinden her bir IGS istasyonu için elde edilen sonuçların beklenen ortalama değerlerini gösterirken, d_0 bu iki değer arasında beklenen farkı temsil etmektedir. Bu durumda, t-dağılımının serbestlik derecesine yaklaşır ve aşağıdaki denklemler elde edilir [28]:

$$T' = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{(s_1^2 / n_1) + (s_2^2 / n_2)}} \quad (1)$$

$$\nu = \frac{(s_1^2 / n_1 + s_2^2 / n_2)^2}{[(s_1^2 / n_1)^2 / (n_1 - 1)] + [(s_2^2 / n_2)^2 / (n_2 - 1)]} \quad (2)$$

Burada ν , Satterthwaite yaklaşımına göre serbestlik derecesi olarak ifade edilmektedir [29].

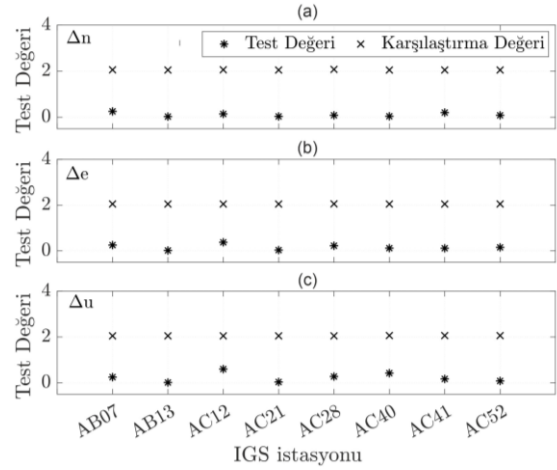
Yukarıda verilen denklemlerde \bar{X}_1 ve \bar{X}_2 iki popülasyonun ortalama değerlerini temsil ederken, s_1^2 ve s_2^2 popülasyonlardaki varyansları, n_1 ve n_2 ise popülasyonlar için ölçüm sayısını göstermektedir.

T' istatistiği kullanılarak hesaplanan test değeri aşağıdaki dağılıma göre değerlendirilir:

$$P(-t_{\alpha/2} < T' < t_{\alpha/2}) \approx 1 - \alpha \quad (3)$$

Burada $t_{\alpha/2}$, ν serbestlik derecesi ile t-dağılımını göstermektedir [28]. Eşitliklere göre elde edilen test değerleri ilgili güven sınırı ile karşılaştırıldığında $|T'| < t_{\nu, 1-\alpha/2}$ ise yani test değeri (T') karşılaştırma değerinden ($t_{\nu, 1-\alpha/2}$) küçük ise değerler arasındaki fark anlamsızdır olarak yorumlanmaktadır [30].

$H_0 : \mu_1 - \mu_2 = d_0$ hipotezi servislerden beklenen değerlerin eşit olduğu yani $H_0 : d_0 = 0$ olduğu durum için kurulmuştur. Buna göre, her bir IGS istasyonu için \bar{X}_1 ve \bar{X}_2 ile ifade edilen OPUS ve AUSPOS yerel koordinat bileşenlerine ait ortalamalar ile bunların s_1^2 ve s_2^2 ile temsil edilen varyansları hesaplanmıştır. Gözlem sayısını belirten n_1 ve n_2 ise zaman serisinin uzunluğuna eşit olup 15 olarak alınmıştır. Sonuçlar, $\alpha = \%5$ yanılma olasılığı ile tüm IGS istasyonları için elde edilmiştir. Şekil 5'teki grafikte "x" karşılaştırma değerini ($t_{\nu, 0.05/2}$), "*" ise test değerini (T') temsil etmektedir. Tüm IGS istasyonlarında her bir yerel koordinat bileşeni için sonuçlar incelendiğinde, test değerlerinin karşılaştırma değerlerinden küçük olduğu elde edilmekte ve $H_0 : d_0 = 0$ hipotezi $\%95$ güven düzeyi ile kabul edilmektedir. Bu durum, OPUS ve AUSPOS servis değerlendirmelerinin özdeş olduğunu ve istatistiki açıdan bir farklılık olmadığını ifade etmektedir.



Şekil 5. Toposentrik koordinatlar ile istatistiksel test (a, b ve c sırasıyla Δn , Δe ve Δu bileşenlerine ait olmak üzere x : t dağılımının $\%95$ olasılıklı güven sınırı değeri; * : test değerini göstermektedir.)

Analiz sonuçlarının sayısal değerleri daha ayrıntılı olarak Tablo 1'de gösterilmektedir. Karşılaştırma değerlerinin ortalaması 2,05 olarak elde edilirken, test değerleri 0,02 ile 0,60 arasında değişmektedir. Δn ve Δe yatay koordinat bileşenleri için test değerlerinin ortalaması sırasıyla 0,11 ve 0,16'dır. En büyük test değerleri ise 0,25 ve 0,37 olmak üzere sırasıyla AB07 ve AC12 istasyonlarından gelmektedir. Δu düşey koordinat bileşeni ise, tüm test değerleri arasında en büyük değere (0,60) sahiptir. Ortalama olarak bakıldığında ise 0,23 ile düşey bileşen yine diğer koordinat bileşenlerinin ortalamasından daha büyük bir değere sahiptir.

Tablo 1. Test değerleri (Parantez içindeki değerler, ilgili test değerlerinin karşılaştırma değeridir.)

	$ T'_{\Delta n} $	$ T'_{\Delta e} $	$ T'_{\Delta u} $
Minimum	0,02 (2,05)	0,02 (2,05)	0,01 (2,05)
Maksimum	0,25 (2,08)	0,37 (2,06)	0,60 (2,06)
Ortalama	0,11 (2,05)	0,16 (2,05)	0,23 (2,05)

4 Sonuçlar

Bu çalışmada bağıl konum belirleme yöntemine göre değerlendirme yapan AUSPOS ve OPUS internet tabanlı veri değerlendirme servislerinin karşılaştırılması ideal olmayan koşullar içinde yer alan Mw=8.2 büyüklüğünde meydana gelen bir deprem örneği için ele alınmıştır. Alaska'da seçilen 8 IGS istasyonundan oluşan 15 günlük veri seti 2021 yılının 203-217. GPS günlerini kapsamaktadır.

İnternet tabanlı değerlendirme servislerinden elde edilen 3 boyutlu kartezyen koordinatlar, yerel koordinat sistemine dönüştürülerek yatay ve düşey bileşenler ile analizler gerçekleştirilmiştir. Öncelikli olarak depremin meydana getirdiği deformasyonlar incelenmiştir. AUSPOS ve OPUS servislerinin deprem gününde koordinat bileşenlerinde meydana gelen sıçramaları yakaladığı görülmektedir. En büyük yer değiştirme, depremin gerçekleştiği noktaya en

yakın AB13 ve AC21 istasyonlarında görülmüştür. Tüm istasyonlardaki zaman serileri birlikte ele alındığında internet tabanlı servislerden elde edilen yerel koordinat bileşenleri arasındaki en büyük farklar kuzey-güney bileşeninde yaklaşık 5 cm; doğu-batı bileşeninde yaklaşık 7 cm; yükseklik bileşeninde ise yaklaşık 2,5 cm olarak elde edilmektedir. Farkların dağılımı genel olarak sıfır etrafında toplanmaktadır ve normal dağılımla uyumludur.

İnternet tabanlı servisler arasındaki farkların istatistiksel olarak da araştırılabilmesi amacıyla Walpole vd. 'de [28] verilen ve Satterthwaite yaklaşımına göre [29] elde edilen serbestlik derecesi ile t-dağılımının %95 güven düzeyi için test uygulanmıştır. OPUS ve AUSPOS yerel koordinat bileşenlerine ait ortalamalar ile bunların varyansları hesaplanmış ve servisler arasındaki koordinat farklarının 0 kabul edildiği sıfır hipotezi kurulmuştur. Her bir IGS istasyonu için gerçekleştirilen testte, tüm test değerleri karşılaştırma değerinden küçük çıkmıştır ve %95 güven düzeyi ile sıfır hipotezi kabul edilmiştir. Yani, OPUS ve AUSPOS internet tabanlı servis değerlendirmelerinin özdeş olduğu ve istatistiki açıdan bir farklılık olmadığı gösterilmiştir. Sonuç olarak, internet tabanlı bağlı değerlendirme servislerin 29 Temmuz 2021 Alaska depremi üzerinden yapılan analizlerde ideal olmayan koşullarda da uyumlu sonuçlar verdiği elde edilmiştir.

Teşekkür

Yazarlar veri setinin sağlandığı UNAVCO servisine ve MATLAB lisansını sağlayan Yıldız Teknik Üniversitesi Rektörlüğü'ne teşekkür eder. Çizimler Generic Mapping Tools (GMT) yazılımı [31] kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar arasında çıkar çatışması yoktur.

Benzerlik oranı (iThenticate): %8

Kaynaklar

- [1] R. Ghoddousi-Fard and P. Dare, Online GPS processing services: An initial study. *GPS Solutions*, 10(1), 12-10, 2006. <https://doi.org/10.1007/s10291-005-0147-5>.
- [2] R. Ebner and W.E. Featherstone, How well can online GPS PPP post-processing services be used to establish geodetic survey control networks. *Journal of Applied Geodesy*, 2(3), 149-157, 2008. <https://doi.org/10.1515/JAG.2008.017>.
- [3] M. Tsakiri, GPS Processing Using Online Services. *Journal of Surveying Engineering*, 134(4), 115-125, 2008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9453\(2008\)134:4\(115\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9453(2008)134:4(115))
- [4] A. El-Mowafy, Analysis of web-based GNSS post-processing services for static and kinematic positioning using short data spans. *Survey Review*, 43(322), 535-549, 2011. <https://doi.org/10.1179/003962611X13117748892074>
- [5] G. Wang and T. Soler, OPUS for Horizontal Subcentimeter-Accuracy Landslide Monitoring: Case Study in the Puerto Rico and Virgin Islands Region. *Journal of Surveying Engineering*, 138(3), 143-153, 2012. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)su.1943-5428.0000079](https://doi.org/10.1061/(asce)su.1943-5428.0000079).
- [6] T. Öcalan, B. Erdogan and N. Tunalioglu, Analysis of web-based online services for GPS relative and precise point positioning techniques. *Boletim de ciencias geodesicas*, 19(2), 191-207, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1982-21702013000200003>.
- [7] A.I. El-Hattab, Assessment of PPP for establishment of CORS network for municipal surveying in Middle East. *Survey Review*, 46(335), 97-103, 2014. <https://doi.org/10.1179/1752270613Y.0000000064>.
- [8] K. Dawidowicz and G. Krzan, Coordinate estimation accuracy of static precise point positioning using online PPP service, a case study. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 49(1), 37-55, 2014. <https://doi.org/10.1007/s40328-013-0038-0>.
- [9] Q. Guo, Precision comparison and analysis of four online free PPP services in static positioning and tropospheric delay estimation. *GPS Solutions*, 19(4), 537-544, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10291-014-0413-5>.
- [10] R.M. Alkan, V. İlçi, I.M. Ozulu and M.H. Saka, A comparative study for accuracy assessment of PPP technique using GPS and GLONASS in urban areas. *Measurement*, 69, 1-8, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.03.012>.
- [11] C.O. Yigit, M.Z. Coskun, H. Yavasoglu, A. Arslan and Y. Kalkan, The potential of GPS Precise Point Positioning method for point displacement monitoring: A case study. *Measurement*, 91, 398-404, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.05.074>.
- [12] S. Alçay ve H.I. Imren, OPUS ve AUSPOS web-tabanlı GPS değerlendirme servislerinin farklı gözlem süreleri için doğruluk performanslarının incelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(2), 452-466, 2017.
- [13] M. Jamieson and D.T. Gillins, Comparative Analysis of Online Static GNSS Postprocessing Services. *Journal of Surveying Engineering*, 144(4), 2018. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)su.1943-5428.0000256](https://doi.org/10.1061/(asce)su.1943-5428.0000256)
- [14] C. Aydin, S.Ö. Uygur, S. Çetin, A. Özdemir and U. Dogan, Ability of GPS PPP in 2D deformation analysis with respect to GPS network solution. *Survey Review*, 51(366), 199-212, 2019. <https://doi.org/10.1080/00396265.2017.1415664>.
- [15] M. Şimşek, S. Özarpaç ve U. Doğan, Tektonik çalışmalarda web tabanlı online GNSS servislerinin performans analizi. *Geomatik*, 4(2), 147-159, 2019. <https://doi.org/10.29128/geomatik.511758>.
- [16] Ö. Gökdaş and M.T. Özlüdemir, Velocity estimation performance of GNSS online services (APPS and AUSPOS). *Survey Review*, 53(378), 280-288, 2021. <https://doi.org/10.1080/00396265.2020.1809233>.
- [17] C. İnal, B. Bilgen, S. Bülbül, ve M. Başbük, Farklı uydu sistemi kombinasyonlarının gerçek zamanlı hassas nokta konumlamaya etkisi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(1), 109-115, 2022.

- [18] Ö. Güneş and D.Ö. Demir, Comparing results of online GNSS services: A case study from Turkey. *Survey Review*, 54(383), 163–171, 2022. <https://doi.org/10.1080/00396265.2021.1893470>.
- [19] K. Gümüş, C.T. Çelik and M.G. Gümüş, A statistical investigation on the effects of different GNSS systems. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(2), 432-442, 2023.
- [20] AUSPOS Online GPS Processing Service. <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/auspos>, Accessed 19 February 2023.
- [21] R. Dach, S. Lutz, P. Walser and P. Fridez, Bernese GNSS Software Version 5.2. User manual. Bern: Astronomical Institute, University of Bern, 2015. <https://doi.org/10.7892/boris.72297>.
- [22] OPUS: Online Positioning User Service. <https://geodesy.noaa.gov/OPUS/about.jsp>, Accessed 21 February 2023.
- [23] Pages: Program for Adjustment of GPS Ephemerides. <https://geodesy.noaa.gov/GRD/GPS/DOC/pages/pages.html>, Accessed 5 March 2023.
- [24] A.E. Niell, Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(2), 3227–3246, 1996. <https://doi.org/10.1029/95jb03048>.
- [25] USGS Earthquake Hazards Program. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/ak0219neiszm/executive>, Accessed 12 April 2023.
- [26] L. Ye, Y. Bai, D. Si, T. Lay, K.F. Cheung and H. Kanamori, Rupture Model for the 29 July 2021 MW 8.2 Chignik, Alaska earthquake constrained by seismic, geodetic, and tsunami observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(7), 2022. <https://doi.org/10.1029/2021JB023676>.
- [27] C. Liu, T. Lay and X. Xiong, The 29 July 2021 MW 8.2 Chignik, Alaska Peninsula earthquake rupture inferred from seismic and geodetic observations: re-rupture of the western 2/3 of the 1938 rupture zone. *Geophysical Research Letters*, 49(4), 2022. <https://doi.org/10.1029/2021GL096004>.
- [28] R.E. Walpole, R.H. Myers, S.L. Myers and K. Ye, Probability and statistics for engineers and scientists. 9th ed., Pearson Education, USA, 2012.
- [29] F.E. Satterthwaite, An Approximate Distribution of Estimates of Variance Components. *Biometrics bulletin*, 2(6), 110-114, 1946. <https://doi.org/10.2307/3002019>.
- [30] K.R. Koch, Parameter estimation and hypothesis testing in linear models. Springer, Berlin, 1999.
- [31] P. Wessel and W.H. Smith, New, improved version of Generic Mapping Tools released. *Eos, transactions American geophysical union*, 79(47), 579-579, 1998. <https://doi.org/10.1029/98EO00426>.





Exploring the performance of PySpark and Scikit-Learn libraries in developing fall detection systems

Düşme algılama sistemlerinin geliştirilmesinde PySpark ve Scikit-Learn kütüphanelerinin performansının araştırılması

Erhan Kavuncuoğlu^{1,*} 

¹ Cumhuriyet Üniversitesi, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, 58840, Sivas Türkiye

Abstract

Falls pose a significant risk, often resulting in serious injuries and reduced quality of life for the elderly population. Accurate and effective fall detection systems can play an important role in reducing these risks. This study presents a comparative analysis of the performance of PySpark and Scikit-Learn libraries in the development of fall detection models. Using both libraries, fall detection models were built using five popular machine learning algorithms, including logistic regression, gradient boosting classifier, random forest, support vector machine and decision tree. The models were evaluated using comprehensive metrics (accuracy, sensitivity, specificity, confusion matrix). In the study, 26 different features were extracted from the Sisfall dataset consisting of falls and activities of daily living data in five main categories: basic statistical features, frequency domain features, time series features, motion features and relational features. These features were incorporated into the fall detection models to increase their ability to recognise falls. The findings show that both PySpark and Scikit-Learn offer powerful and effective results in fall detection. The highest performance rates of both libraries were achieved by logistic regression. Furthermore, PySpark exhibited slightly longer training times than Scikit-Learn, which performed better in the test. In conclusion, this study contributes to the development of fall detection systems to improve the safety and well-being of the elderly and contributes to the literature by providing a new feature extraction method.

Keywords: Fall detection, Artificial intelligence, Machine learning, PySpark, Scikit-Learn

1 Introduction

Fall detection is an important research area, particularly for the well-being and safety of the elderly population in the domains of fall sensing, machine learning, and data analysis. This study aims to compare the performance of fall detection models using PySpark and Scikit-Learn libraries utilizing the Sisfall [1] dataset.

PySpark is an open-source cluster computing framework that provides a distributed computing environment for large-

Öz

Düşmeler, genellikle ciddi yaralanmalara ve yaşlı nüfusun yaşam kalitesinin azalmasına neden olan önemli bir risk oluşturur. Doğru ve etkili düşme tespit sistemleri, bu riskleri azaltmada önemli bir rol oynayabilir. Bu çalışma, düşme tespit modellerinin geliştirilmesinde PySpark ve Scikit-Learn kütüphanelerinin performansını karşılaştırmalı bir analiz sunmaktadır. Her iki kütüphane de kullanılarak, lojistik regresyon, gradyan arttırma sınıflandırıcısı, rastgele orman, destek vektör makinesi ve karar ağacı dahil olmak üzere beş popüler makine öğrenme algoritması kullanılarak düşme tespit modelleri oluşturuldu. Modeller, kapsamlı metrikler (doğruluk, duyarlılık, özgüllük, karışıklık matrisi) kullanılarak değerlendirildi. Çalışmada düşme ve günlük yaşam aktivite verilerinden oluşan Sisfall veri setinden 26 farklı özellik beş ana kategoride çıkarıldı: temel istatistiksel özellikler, frekans alanı özellikleri, zaman serisi özellikleri, hareket özellikleri ve ilişkisel özellikler. Bu özellikler, düşme tespit modellerine düşmeleri tanıma yeteneklerini artırmak için dahil edildi. Bulgular, hem PySpark hem de Scikit-Learn'in düşme tespitinde güçlü ve etkili sonuçlar sunduğunu göstermektedir. Her iki kütüphane de en yüksek performans oranlarına lojistik regresyon ile ulaşılmıştır. Ayrıca, PySpark, testte daha iyi performans sergileyen Scikit-Learn'e göre biraz daha uzun eğitim süreleri sergilemiştir. Sonuç olarak, bu çalışma, yaşlıların güvenliğini ve refahını artırmak için düşme tespit sistemlerinin geliştirilmesine katkıda bulunduğu gibi yeni bir özellik çıkarma yöntemi sunarak literatüre katkıda bulunuyor.

Anahtar kelimeler: Düşme Algılama, Yapay zeka, Makine öğrenmesi, PySpark, Scikit-Learn

scale data processing. It is suitable for processing big data and complex computations by offering various machine learning algorithms and tools [2-6]. Patel et al. [7] focused on a real-time scalable data collection process for COVID-19 data and highlighted PySpark as a useful tool for this process. The authors emphasized the comprehensive and efficient capabilities of PySpark for processing large datasets in parallel clusters, specifically in machine learning applications. Another study by Gupta et al. [8] presented

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ekavuncuoglu@cumhuriyet.edu.tr (E. Kavuncuoğlu)
Geliş / Received: 10.10.2023 Kabul / Accepted: 12.02.2024 Yayınlanma / Published: 15.04.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1388789

Apache Spark and a deep learning-based big data analysis framework using PySpark. The authors performed experimental analyses on real-world datasets and demonstrated the effectiveness of their framework compared with traditional big data analysis techniques. Additionally, Rothauge [9] discussed the use of PySpark as an interface for the Alchemist system. Alchemists have enabled Apache Spark to achieve better performance by providing interfaces with high-performance computing libraries for large-scale distributed computations. The author highlights the deployment options and data transfer times when using PySpark with Alchemist. These studies demonstrate the versatility and efficiency of PySpark in large-scale data processing and machine learning tasks, emphasizing its use in real-time data collection, integration with other data analysis frameworks, etc.

On the other hand, Scikit-Learn is a widely used machine learning library in Python that provides comprehensive tools for data analysis and modelling [3-6], [10]. Abraham et al. [11] focused on the use of Scikit-Learn for machine learning in neuroimaging. The authors demonstrated how Scikit-Learn can perform key analysis steps in functional neuroimaging applications, highlighting its versatility in brain studies. Another study by Buitinck et al. [12] discussed the design choices of Scikit-Learn Application Programming Interface (API). The authors explained that Scikit-Learn is designed to be simple, efficient, and accessible to non-experts, emphasizing its reusability in various contexts. Auti et al. [13] mentioned the use of Scikit-Learn for data preparation in data mining, specifically for normalization, standardization, and handling outliers or missing data. Furthermore, a review article by Hao and Ho [14] provides an overview of Scikit-Learn as a machine-learning package in Python. The authors highlight the comprehensive list of machine learning methods included in Scikit-Learn and their adherence to unified data and modelling procedure rules, emphasizing the ease of use for educators and behavioral statisticians. Overall, these studies showcase the varied applications and functionalities of Scikit-Learn in machine learning and data analysis across different domains, highlighting its versatility, simplicity, and efficiency.

In this study, several commonly used machine learning algorithms, such as logistic regression, gradient boosting classifier, random forest, support vector machine, and decision tree, were employed to develop the fall detection models. These algorithms were chosen for their effectiveness in classification tasks, ability to handle both numerical and categorical data, and high accuracy achievements in fall detection [15-19].

The performance of the models was evaluated using various metrics, such as accuracy, precision, recall, confusion matrix, training time, and testing time, obtained through PySpark and Scikit-Learn. By comparing the performance of PySpark and Scikit-Learn based on these metrics, this study aimed to determine which library is more successful in fall detection. The findings of this research will guide researchers and practitioners in selecting the most suitable library for developing fall detection systems.

The following sections explain the methodology used in this study, present the obtained results, discuss the implications of the findings, and provide a comprehensive analysis of PySpark and Scikit-Learn in the context of fall detection.

2 Materials and methods

In this study, the Sisfall dataset, which includes falls and activities of daily living (ADL) obtained from an experiment conducted by the Systemic research group, was utilized. The collaboration was established with 38 volunteers, consisting of elderly and young adults. The elderly group comprised 15 participants (8 males and 7 females) who were in good health and independent. The young adult group consisted of 23 participants (11 males and 12 females). Each participant repeated 15 different fall movements and 19 different ADLs, five times. Within the elderly group, certain ADLs (activities numbered 6, 13, 18, and 19) were not provided with medical advice, and some activities could not be carried out due to personal barriers. Additionally, one participant simulated fall movements and ADLs due to a judo experience (Table 1).

Data were collected using a specialized wearable device. The equipment included a Kinetis MKL25Z128VLK4 microcontroller produced by NPX in Austin, Texas, USA, an analog device ADXL345 accelerometer (with a range of ± 16 g and 13-bit analog-to-digital conversion freedom), a Freescale MMA8451Q accelerometer (with a range of ± 8 g and 14-bit ADC), an ITG3200 gyroscope (with a range of $\pm 2000^\circ/s$ and 16-bit ADC), and an SD card. The device was mounted on the participant's waist and powered by a 1000 mA/hr general-purpose battery. The device was positioned using a single accelerometer system owing to its ability to differentiate between different activities. The device was set up to record the original sampling frequency (200 Hz).

This research focused on training algorithms using PySpark and Scikit-Learn libraries with activity data from 23 young participants to detect and prevent falls. The participants were asked to perform 15 different fall movements and 19 ADLs. In total, 3532 observations were generated during the experiment. Upon inspection of the dataset, it was observed that 19 ADLs had 5 repetitions, with 4 of them having only 1 repetition. Similarly, 15 fall movements were collected with 5 repetitions. As a result, the total number of observations should have been 3542; however, only 3532 observations were obtained because of missing repetitions in some cases. Data erasures occurred because of missing repetitions, such as the absence of a repetition in the 17th ADL for SA15; the absence of a repetition in the 6th ADL for SA17; and the absence of repetitions in the 1st fall movement, 6th ADL, 10th fall movement, and 17th ADL for SA20, resulting in a total of 10 missing observations. Therefore, individuals with missing repetitions were considered test data to address imbalances in the training set.

The method section applied three main stages for fall detection using a dataset consisting of 3532 records from 23 young volunteers: pre-processing, feature extraction,

Table 1. SisFall Dataset: List of Falls and ADLs

Falls					ADLs		
No	Description		Cause of Fall	Trial s	No	Description	Trial s
1	Falling walking	forward while	Slip	5	1	Slow walking	1
2	Falling walking	backward while	Slip	5	2	Fast walking	1
3	Lateral walking	falling while	Slip	5	3	Slow jogging	1
4	Falling forward due to a trip		Trip without stumbling	5	4	Fast jogging	1
5	Falling jogging	forward while	Trip	5	5	Ascending and descending stairs slowly	5
6	Vertical walking	Falling while	Fainting	5	6	Ascending and descending stairs quickly	5
7	Falling while walking, using hands on a table to dampen the fall		Fainting	5	7	Slowly sit in a chair of medium height, wait for a moment, and stand up slowly.	5
8	Falling attempting to get up	forward when	Attempting to get up	5	8	Quickly sit in a chair of medium height, wait for a moment, and stand up quickly.	5
9	Lateral attempting to get up	falling when	Attempting to get up	5	9	Slowly sit in a low-height chair, wait for a moment, and stand up slowly.	5
10	Falling attempting to sit down	forward when	Attempting to sit down	5	10	Quickly sit in a low-height chair, wait for a moment, and stand up quickly.	5
11	Falling attempting to sit down	backward when	Attempting to sit down	5	11	Sitting for a moment, attempting to get up, and collapsing back into the chair.	5
12	Lateral attempting to sit down	fall when	Attempting to sit down	5	12	Sitting for a moment, lying down slowly, waiting for a moment, and sitting up again.	5
13	Falling sitting	forward while	Fainting or falling asleep	5	13	Sitting for a moment, lying down quickly, waiting for a moment, and sitting up again.	5
14	Falling sitting	backward while	Fainting or falling asleep	5	14	Changing from lying on one's back to a lateral position, waiting for a moment, and changing back to lying on one's back.	5
15	Lateral falling while sitting		Fainting or falling asleep	5	15	Standing, bending at knees slowly, and getting up.	5
					16	Standing, bending without bending knees slowly, and getting up.	5
					17	Boarding a car, staying seated, and disembarking from the car.	5
					18	Stumbling while walking.	5
					19	Gently jumping without falling (attempting to reach a high object).	5

and classification. During the pre-processing stage, various adjustments and cleaning procedures were performed to obtain meaningful data from the dataset. In the feature extraction stage, significant features are extracted from the preprocessed dataset to detect fall events. Finally, in the classification stage, the extracted features were utilized to determine whether a fall event occurred. The performance metrics required for fall detection were analysed using five

different machine learning techniques available in the PySpark and Scikit-Learn libraries.

2.1 Data formation

The Sisfall dataset is widely used for developing fall detection algorithms. This dataset is based on data collected from the ADXL345 accelerometer sensor (A_x, A_y, A_z), the ITG3200 gyroscope sensor (G_x, G_y, G_z), and the MMA8451Q accelerometer sensor (A_x, A_y, A_z). Here, the

abbreviations "A" and "G" refer to the accelerometer and gyroscope sensor data, respectively, and "x, y, and z" represent each vertical axis (Figure 1). Each file consisted of data records with 9 columns and 200 rows at a frequency of 200 samples per second. The data collection duration varied from 12 seconds (s) to 100 s for each movement. In this study, one accelerometer and one gyroscope were included in the research out of three sensors. The accelerometer to be used with the ITG3200 gyroscope was chosen considering the measurement range. The ADXL345 accelerometer is capable of measuring between -16 g and +16g, while the MMA8451Q accelerometer can measure between -8 g and +8g. Therefore, the ADXL345 accelerometer was preferred because a wider measurement range was required. This indicates that data records consisting of 6 columns and 200 rows were considered for this study.

To manage the large dataset, the data frames were divided into 0.5-second frames. Each 0.5-second frame consists of two 0.25-second frames (T_{HA}) surrounding the highest acceleration recorded by the waist sensor. This approach simplifies data management in the development of fall-detection algorithms.

$$T_{HA} = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2} \quad (1)$$

The total acceleration (T_{HA}) vector is calculated from the average acceleration values along the x, y, and z axes as shown in Equation (1). Because each test lasts between 12 s to 100 s, the T_{HA} vector typically varies between 2400 to 20000 observations (12 s x 200 Hz - 100 s x 200 Hz). To remove meaningless data, the first and last 50 observations (0.25 seconds x 200 Hz) at the beginning and end of each test are disregarded.

In addition, any unusually high acceleration values are discarded. The remaining values include the highest acceleration value, which is used to create a 0.5-second vector consisting of two 0.25-second frames surrounding this value. Each frame contains 50 observations (0.25 seconds x 200 Hz), resulting in a total of 101 observations (50 observations + T_{HA} value + 50 observations). A single test repetition yields a data array consisting of 101 rows and 6 columns. Each row includes the measured acceleration or angular velocity values along the x, y, and z axes, and each column represents a vector. Therefore, with a single repetition of the test, a dataset of 101 * 6 is formed for one sensor unit.

2.2 Feature extraction

In this study, 26 different types of features were defined for motion recognition. Each sensor unit records signals along three axes for acceleration (A_x, A_y, A_z) and angular velocity (G_x, G_y, G_z). From these signals, various features are extracted at 0.5-second intervals. These features are divided into five main categories: basic statistical features (42 * 1), frequency domain features (114 * 1), time series features (94 * 1), motion features (27 * 1), and relational features (27 * 1). Using these features, a feature vector is generated for each movement (Table 2).

In this study, 3532 movements were recorded, including 15 falls and 19 activities of daily living. For each movement, 352 features were extracted (352 * 1). Using these features, a feature set of dimensions of 352 (352 * 3532) was created.

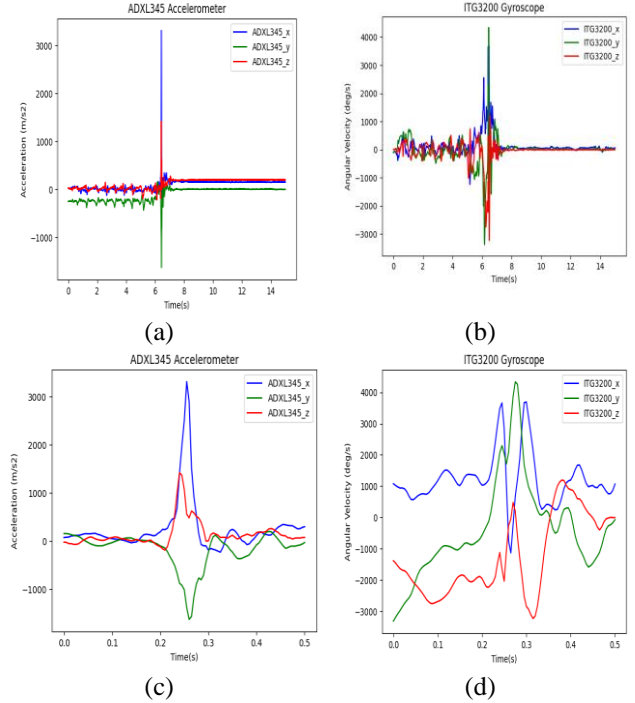


Figure 1. These figures showcase participant SA05 performing the "Fall Number 2: Falling backward while walking due to slipping" movement. Figures (a) and (b) display raw data recordings of 15 seconds (3000 samples) sampled at 200 Hz. Figures (c) and (d) depict the same data but compressed to 101 samples, representing 0.5 seconds of shortened data.

2.3 Machine learning algorithms

In this study, machine-learning algorithms were employed to detect falls and daily life activities. Features were extracted from the raw data and used as inputs for the classifiers. When an algorithm detects a fall or daily life activity, the developed model associates the input data with the corresponding labeled fall or daily life activity.

Five different machine learning algorithms were applied to detect falls, and their classification performance was compared. The following is a brief description of these algorithms.

2.3.1 Decision tree (DT)

DT is an algorithm used to make predictions by analyzing the data. The working principle of this algorithm involves creating a tree-like structure, in which each node represents a feature and each branch represents a decision. Starting from the root node, a decision tree asks questions regarding a feature and branches downwards, based on the responses. This process continues until a leaf node representing a prediction is reached. Decision trees can handle numerical and categorical data and have been used in fall detection systems to classify fall events [32].

Table 2. Features and Formation of Vector. A, G, Var., Std., Freq. are the accelerometer, gyroscope, variance, standard deviation, and frequency, respectively.

Type	Code	Features	Number of Features
Basic Statistical Features	F1	Minimum values [20]	xyz xyz A G 6 Features
	F2	Maximum values [21]	xyz xyz A G 6 Features
	F3	Mean values [20]	xyz xyz A G 6 Features
	F4	Variance [22]	xyz xyz A G 6 Features
	F5	Skewness [23]	xyz xyz A G 6 Features
	F6	Kurtosis [23]	xyz xyz A G 6 Features
	F7	Root Mean Square [24]	xyz xyz A G 6 Features
Frequency Domain Features	F8	Discrete Fourier Transformation [25]	xxxxx yyyyy zzzzz A _x , A _y , ..., G _z 5, 5, ..., 5 DFT(Peak) - DFT (Freq.) 30 - 30 60 Features
	F9	Power Spectral Density [21]	xxxxx yyyyy zzzzz A _x , A _y , ..., G _z 51 Features
	F10	Angular Velocity [26]	Var. Std. Energy xyz xyz xyz G 3 Features
Time Series Features	F11	Autocorrelation [27]	xxxxxxxxxxx y..z.. A _x , A _y , ..., G _z 11, 11,11 DFT(Peak) - DFT (Freq.) 66 Features
	F12	Spectral Entropy [28]	xyz xyz A G 6 Features
	F13	Energy [24]	xyz xyz A G 6 Features
	F14	Singular Value Decomposition [29]	xyz xyz A G 6 Features
	F15	Signal Magnitude Area [30]	xyz A 10 Features

Table 2.(Continue) Features and Formation of Vector. A, G, Var., Std., Freq. are the accelerometer, gyroscope, variance, standard deviation, and frequency, respectively.

Motion Features	F16	Range of Variations [21]	xyz xyz A G 6 Features
	F17	Coefficient of Variation [20]	xyz xyz A G 6 Features
	F18	Standard Error Mean [20]	xyz xyz A G 6 Features
	F19	Jerk [26]	xyz A 3 Features
	F20	Peak values [21]	xyz A 3 Features
	F21	Mean Crossing Rate [24]	xyz A 3 Features
Relational Features	F22	Correlation [20]	xyz A 3 Features
	F23	Covariance [20]	xyz A 3 Features
	F24	Autoregression [27]	xyz A 33 Features
	F25	Cross-Correlation [24]	xyz A 33 Features
	F26	Mutual Information [31]	xyz A 3 Features

2.3.2 Support vector machine (SVM)

SVM specializes in separating different categories by creating a hyperplane in a multidimensional feature space. The main objective of the SVM is to have a hyperplane that optimizes the margin between the data samples of each category. It is widely used in fall detection systems because of its ability to handle complex data structures and effectively generalize [33], [34].

2.3.3 Random forest classifier (RFC)

RFC is a technique that integrates multiple decision trees to produce predictions. In this approach, each tree is trained on a randomly selected subset of training data and pertinent features. Finally, an aggregated prediction is obtained through majority voting or averaging. Random forest is robust to overfitting and can effectively handle high-dimensional data. It has been used to improve the classification accuracy in fall detection systems [35].

2.3.4 Gradient boosting classifier (GBC)

GBC is an algorithm that combines several weak classifiers to create a strong classifier. The methodology of this algorithm involves building a progressive model with each subsequent classifier and correcting the mistakes of the previous classifiers. Gradient Boosting Classifier has achieved high accuracy in fall detection tasks [36].

2.3.5 Logistic regression (LR)

LR is an algorithm used to model the relationship between one or more independent variables and a dependent variable. LR belongs to the family of supervised learning algorithms. The implementation of logistic regression can vary depending on whether the dependent variable is binary or multiclass. Logistic regression has been used to differentiate between falls and daily life activities in fall detection systems [37], [38].

2.4 Classification

Fall detection systems are crucial, especially for the elderly and disabled. However, the performance of fall detection systems depends on the machine learning techniques employed and quality of the training data used.

In this study, the accuracy, sensitivity, and specificity criteria were used to evaluate the performance of the fall detection system. The accuracy represents the overall correctness rate of the system's decisions. The sensitivity represents the rate at which the system correctly detects all falls. Specificity represents the rate at which the system correctly identifies non-fall situations. To determine these criteria, four different scenarios need to be considered. In the first scenario, a real fall occurs, and the algorithm correctly detects it (True Positive - T_p). In the second scenario, no fall occurs, and the algorithm does not produce a fall alert (True Negative - T_n). T_n and T_p scenarios are considered as correct decisions by the algorithm. Incorrect decisions are labeled wrongly by the algorithm. In the third scenario, no fall actually occurs, but the algorithm incorrectly generates a fall alert (False Positive - F_p). Additionally, the algorithm may fail to detect a fall, which is known as a False Negative (F_n). This scenario is the most dangerous, as it can lead to severe injuries or even fatalities.

Sensitivity (Se), also known as Recall, is one of the most important criteria for fall detection systems, as a False Negative, which is the failure to detect an actual fall, can lead to severe injuries or death as in Equation (2).

$$Se = \frac{T_p}{T_p + F_n} \times 100 \quad (2)$$

Specificity (Sp) is the measure of an algorithm's ability to correctly identify negative cases. It represents the ratio of correctly identified true negatives (T_n). A high Sp value indicates that the algorithm is successful in accurately identifying non-fall cases as in Equation (3). This is important in minimizing false alarms.

$$Sp = \frac{T_n}{T_n + F_p} \times 100 \quad (3)$$

Accuracy (Acc) measures how well an algorithm predicts both sensitivity (Se) and specificity (Sp). Accuracy is calculated from T_p , T_n , F_p and F_n as in Equation (4).

$$Acc = \frac{T_p + T_n}{T_p + T_n + F_p + F_n} \times 100 \quad (4)$$

Therefore, a good binary classifier is expected to have high scores for all three criteria: sensitivity, specificity, and accuracy. However, in the case of fall detection, sensitivity is often the most important criteria.

This study aims to detect unexpected falls during daily activities. An ideal fall detection system should be able to distinguish falls resulting from rapid movements of body parts from routine activities. The algorithms need to be robust, intelligent, and sensitive in order to minimize false

positive and false negative outcomes. While false positive alerts can be canceled by the user, it is critical that falls are not falsely classified as another activity. Missed falls can negatively impact a user's physical or mental well-being and hinder opportunities for intervention. Therefore, it is important for fall detection systems to have a high sensitivity and not miss any falls. Additionally, measures should be taken to prevent false alarm notifications from unnecessarily consuming the system resources. This study aimed to enhance the reliability and sensitivity of the proposed algorithm.

One of the most effective strategies for evaluating the effectiveness of machine learning models is to test them with unknown data in addition to performance criteria. In this study, a dataset collected from two groups consisting of 23 young adult participants was used. A test set of seven individuals was separated to evaluate the performance of the model. This approach ensures that no samples from the test set are used during the training of the model, thereby providing a more realistic and unbiased performance evaluation.

3 Results and discussion

In this section, the accuracy performance of machine learning algorithms trained on the fall detection dataset using PySpark and Scikit-Learn libraries are compared independently. Subsequently, the models with the highest training accuracy were evaluated for their generalization performance on the test set, including the accuracy, sensitivity, specificity, training time, and test time. After obtaining the results, the artificial intelligence library with the highest fall-detection performance was identified.

Table 3 shows the performance of five different machine learning algorithms for predicting fall and ADL classes using the PySpark library. When assessing the results of each algorithm, specific strengths and weaknesses were identified.

The LR algorithm stands out with the highest accuracy (98.40%). These results demonstrate the successful ability of the LR algorithm to distinguish between the fall and ADL classes. Additionally, both the sensitivity (97.89%) and specificity (98.89%) values were considerably high. However, the training time was longer than those of the other algorithms (12.3538 s), and the test time was slightly longer (0.1675 s).

The RFC algorithm also performs well, achieving a high accuracy rate of 98.31%. Both the sensitivity (98.08%) and specificity (98.53%) values are at a high level. Furthermore, the training time is similar to that of the SVM algorithm (6.6498 s), and the test time could be completed in a short period (0.1904 s).

The SVM algorithm also provided a high accuracy rate (98.31%) with balanced sensitivity (97.70%) and specificity (98.89%). The training time was slightly longer than that of the other algorithms (6.7290 s), but the test time was short (0.0942 s).

The DT algorithm achieved high accuracy (97.56%) with high sensitivity (98.27%) and specificity (96.88%). The

training time was 2.6269 s and the testing process was completed in 0.2263 s.

The GBC algorithm demonstrated similar performance to the other algorithms, achieving an accuracy rate of 97.75%. The sensitivity (97.70%) and specificity (97.79%) were balanced. However, the training time was slightly longer than those of the other algorithms (10.8316 s), and the test time was slightly higher (0.1849 s).

In conclusion, these findings indicate that different algorithms can be preferred depending on the specific datasets and usage scenarios. In cases that require faster results, algorithms such as SVM or LR, which perform faster, can be chosen. However, for the highest accuracy rate, algorithms such as LR, RFC, and SVM should be preferred. Therefore, the choice of the algorithm depends on many factors that need to be considered within a specific application context.

Furthermore, Table 4 evaluates the abilities of different machine learning algorithms to predict the "Falls" and "ADL" classes using the Scikit-Learn library.

According to the Accuracy results, LR (98.60%) stands out as the algorithm with the highest accuracy rate. This indicates that the algorithm generally classified the dataset correctly. On the other hand, DT (96.07%) appears to have the lowest accuracy rate, meaning it has a tendency to make more errors compared to the other algorithms.

The Sensitivity values measure the ability to correctly identify the "Falls" class. In this regard, SVM (98.28%) had the highest sensitivity values, indicating a better ability to identify the "Falls" class. DT (94.65%), on the other hand, has the lowest sensitivity value, indicating a tendency to misclassify the "Falls" class more frequently.

The Specificity metric measures the ability to correctly identify the "ADL" class. In this regard, LR (99.08%) has the highest specificity value, implying a better ability to identify the "ADL" class. On the other hand, SVM (97.25%) has the lowest specificity value, indicating a tendency to misclassify the "ADL" class more frequently.

Table 3. Analysis of fall detection performance using different machine learning techniques with the PySpark library on the test set. C.Fall: Classified Fall, C.ADL: Classified ADL, A.Fall: Actually Fall, A.ADL: Actually ADL

PySpark Library										
	DT		SVM		GBC		RFC		LR	
	C.Fall	C.ADL	C.Fall	C.ADL	C.Fall	C.ADL	C.Fall	C.ADL	C.Fall	C.ADL
A.Fall	514	9	511	12	511	12	513	10	512	11
A.ADL	17	528	6	539	12	533	8	537	6	539
Sp (%)	96.88		98.89		97.79		98.53		98.89	
Se (%)	98.27		97.70		97.70		98.08		97.89	
Acc (%)	97.56		98.31		97.75		98.31		98.40	
Training Time	2.6269		6.7290		10.8316		6.6498		12.3538	
Test Time	0.2263		0.0942		0.1849		0.1904		0.1675	

Table 4. Analysis of fall detection performance using different machine learning techniques with the Scikit-Learn library on the test set. C.Fall: Classified Fall, C.ADL: Classified ADL, A.Fall: Actually Fall, A.ADL: Actually ADL

Scikit-Learn Library										
	DT		SVM		GBC		RFC		LR	
	C.Fall	C.ADL	C.Fall	C.ADL	C.Fall	C.ADL	C.Fall	C.ADL	C.Fall	C.ADL
A.Fall	495	28	514	9	513	10	513	10	513	10
A.ADL	14	531	15	530	10	535	8	537	5	540
Sp (%)	97.43		97.25		98.17		98.53		99.08	
Se (%)	94.65		98.28		98.09		98.09		98.09	
Acc (%)	96.07		97.75		98.13		98.31		98.60	
Training Time	0.7036		0.5904		25.8212		0.5156		1.3104	
Test Time	0.0239		0.2283		0.0399		0.0609		0.0259	

Regarding training and test times, RFC (0.5904 seconds) stands out as the fastest-trained algorithm, indicating that the dataset can be trained quickly. Additionally, DT (0.0239 seconds) appears to have the fastest test time, producing results quickly. However, the training time of GBC (25.8212 seconds) is longer compared to other algorithms, so training times should be taken into consideration as well.

In conclusion, while LR exhibits the best overall performance, factors such as training time and test time requirements should be considered. The preference will depend on the specific requirements of the dataset and usage scenario.

The research aimed to compare PySpark and Scikit-Learn libraries in terms of fall detection. The main goal was to assess the performance difference between the two libraries and determine which library achieved better results.

To achieve this, five different machine learning algorithms were examined using both libraries. In the experiments with PySpark, the highest accuracy rate of 98.40% was obtained with the LR algorithm. The sensitivity (97.89%) and specificity (98.89%) values were also quite high. Similarly, in the experiments using the Scikit-Learn library, the highest accuracy rate of 98.60% was achieved with the LR algorithm, which also showed successful results in terms of sensitivity and specificity.

In terms of training time, it appeared that the PySpark library required slightly longer durations. On the other hand, the Scikit-Learn library provided shorter test times. This can vary depending on factors such as the size of the dataset and the processing power. For instance, when working with larger datasets, PySpark might provide faster results due to its parallel processing capabilities.

As a result, both libraries can effectively address the fall detection problem. However, the choice of library and algorithm should depend on factors such as the size of the dataset, processing power, and training/test times. This research can assist users in selecting the most suitable library and algorithm based on their specific requirements and datasets, thus achieving better accuracy performance. In addition, it is worth noting that the comparison between PySpark and Scikit-Learn in the context of fall detection models is a relatively unexplored area in the existing literature. While there have been studies that have examined the performance of these libraries in various machine learning tasks [3-6], their specific application in fall detection has not been extensively investigated. This highlights the novelty and significance of this study in contributing to the understanding of the performance of PySpark and Scikit-Learn in the development of fall detection models.

In addition, when the performance of the study in terms of fall detection was examined, the proposed approach using logistic regression with new features extracted from the SisFall dataset achieved a promising accuracy rate of 98.6% in fall detection. This performance surpasses previous studies like Shi et al. [39] (improved pre-impact fall detection with 95.33% accuracy) and Zulj et al. [40] (various algorithms with accuracies ranging from 80.1% to 98.6%),

and competes favorably with more complex approaches like Lee et al. [41] (fall detection using both plantar pressure and acceleration data with 95% accuracy). These results suggest that the newly extracted features effectively enhance the discriminatory power of fall detection systems, aligning with Gjoreski et al.'s [42] findings on the importance of data fusion and machine learning for accurate activity recognition and fall detection. Importantly, the achieved accuracy paves the way for potential real-world implementation, echoing Ojetola et al.'s [43] emphasis on the significance of wearable sensors in fall prevention. Overall, this study not only contributes to the development of more accurate and effective fall detection systems but also holds promising implications for improving safety measures in various settings.

4 Conclusion

This study comprehensively evaluated the performance of two prominent machine learning libraries, PySpark and Scikit-Learn, in fall detection modeling. The findings demonstrate the robust and efficient capabilities of both libraries in accurately classifying fall events from a diverse set of activities. Logistic regression and random forest algorithms consistently outperformed other models, achieving the highest accuracy rates across both libraries.

PySpark's distributed computing capabilities proved advantageous for handling large datasets, enabling efficient training and processing. However, Scikit-Learn exhibited superior performance in test times, making it more suitable for smaller datasets or real-time applications.

This study distinguishes itself from previous work by employing a comprehensive feature extraction approach that encompasses 26 features across five categories: basic statistical features, frequency domain features, time series features, motion features, and relational features. This novel approach captured a wider range of information from the Sisfall dataset, contributing to the enhanced accuracy observed in this study.

The choice between PySpark and Scikit-Learn for fall detection modeling depends on factors such as dataset size, processing power, and time constraints. PySpark is well-suited for large datasets due to its distributed computing capabilities, while Scikit-Learn offers a user-friendly interface and faster test times for smaller datasets.

Overall, this study provides valuable insights into the strengths and limitations of PySpark and Scikit-Learn for fall detection modeling. It also highlights the effectiveness of the proposed feature extraction approach in improving fall detection accuracy. These findings can guide researchers and practitioners in selecting the most suitable library and algorithm for their specific fall detection needs.

In addition, to always make progress in the research field, it is necessary to ask new questions and generate ideas for future studies.

In this direction, the following possibilities can lead to significant advances in the field of fall detection:

- Integration of different sensors: Combining the data from different sensors (accelerometers, GPS,

cameras, audio, etc.) for fall detection can create a more comprehensive model.

- Investigation of deep learning methods: Deep learning techniques have been shown to be very successful in processing time series data in recent years. Adapting deep learning models for fall detection and comparing their performances will contribute to the advancement of the field.
- Focus on personalized modeling: Developing personalized fall detection models can better adapt to real-world scenarios.

These suggestions reveal exciting research opportunities for the future in the field of fall detection. Each approach should be studied in depth and the effectiveness of fall detection systems in real life should be increased through applied research.

Conflict of interest

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

Data and materials availability

Data and Materials Availability: The dataset utilized in this study has been made available as open source and can be accessed via the following link. (<https://github.com/JiayangLai/SisFallDatasetAnnotation>)

Similarity rate (iThenticate): 16%

References

- [1] A. Sucerquia, J. D. López, and J. F. Vargas-Bonilla, SisFall: A fall and movement dataset, *Sensors*, vol. 17, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2017, doi: [10.3390/s17010198](https://doi.org/10.3390/s17010198).
- [2] M. Islam et al., Deep learning based systems developed for fall detection: A Review, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 166117–166137, 2020, doi: [10.1109/ACCESS.2020.3021943](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3021943).
- [3] T. C. Nokeri, Principal component analysis with Scikit-Learn, PySpark, and h2o, in *data science solutions with python: fast and scalable models using keras, PySpark, mllib, h2o, xgboost, and Scikit-Learn*, T. C. Nokeri, Ed., Berkeley, CA: Apress, 2022, pp. 101–110. doi: [10.1007/978-1-4842-7762-1_9](https://doi.org/10.1007/978-1-4842-7762-1_9).
- [4] T. C. Nokeri, Cluster analysis with Scikit-Learn, PySpark, and h2o, in *data science solutions with python: fast and scalable models using keras, PySpark mllib, h2o, xgboost, and Scikit-Learn*, T. C. Nokeri, Ed., Berkeley, CA: Apress, 2022, pp. 89–99. doi: [10.1007/978-1-4842-7762-1_8](https://doi.org/10.1007/978-1-4842-7762-1_8).
- [5] M. Junaid et al., Performance evaluation of data-driven intelligent algorithms for big data ecosystem, *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 126, no. 3, pp. 2403–2423, Oct. 2022, doi: [10.1007/s11277-021-09362-7](https://doi.org/10.1007/s11277-021-09362-7).
- [6] T. C. Nokeri, Tree modeling and gradient boosting with Scikit-Learn, xgboost, PySpark, and h2o, in *data science solutions with python: fast and scalable models using keras, PySpark mllib, h2o, xgboost, and Scikit-Learn*, T. C. Nokeri, Ed., Berkeley, CA: Apress, 2022, pp. 59–74. doi: [10.1007/978-1-4842-7762-1_6](https://doi.org/10.1007/978-1-4842-7762-1_6).
- [7] T. S. Patel, D. P. Patel, and C. N. Patel, Real time scalable data acquisition of covid-19 in six continents through PySpark - a big data tool. medRxiv, p. 2021.07.04.21259983, Jul. 06, 2021. doi: [10.1101/2021.07.04.21259983](https://doi.org/10.1101/2021.07.04.21259983).
- [8] A. Gupta, H. K. Thakur, R. Shrivastava, P. Kumar, and S. Nag, A big data analysis framework using apache spark and deep learning, in *2017 IEEE International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW)*, Nov. 2017, pp. 9–16. doi: [10.1109/ICDMW.2017.9](https://doi.org/10.1109/ICDMW.2017.9).
- [9] K. Rothauge, H. Ayyalasamayajula, K. J. Maschhoff, M. Ringenburg, and M. W. Mahoney, Running alchemist on cray xc and cs series supercomputers: dask and PySpark interfaces, deployment options, and data transfer times. arXiv, Nov. 28, 2019. doi: [10.48550/arXiv.1910.01354](https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.01354).
- [10] S. Gafner et al., Evaluation of hip abductor and adductor strength in the elderly: a reliability study, *Eur. Rev. Aging Phys. Act.*, vol. 14, no. 1, p. 5, Apr. 2017, doi: [10.1186/s11556-017-0174-6](https://doi.org/10.1186/s11556-017-0174-6).
- [11] A. Abraham et al., Machine learning for neuroimaging with Scikit-Learn, *Front. Neuroinformatics*, vol. 8, 2014, doi: [10.3389/fninf.2014.00014](https://doi.org/10.3389/fninf.2014.00014).
- [12] L. Buitinck et al., API design for machine learning software: experiences from the Scikit-Learn project. arXiv, Sep. 01, 2013. doi: [10.48550/arXiv.1309.0238](https://doi.org/10.48550/arXiv.1309.0238).
- [13] A. Auti, D. Patil, O. Zagade, P. Bhosale, and P. Ahire, Bitcoin price prediction using svm, vol. 6, no. 11, 2022.
- [14] J. Hao and T. K. Ho, Machine learning made easy: a review of Scikit-Learn package in python programming language, *J. Educ. Behav. Stat.*, vol. 44, no. 3, pp. 348–361, Jun. 2019, doi: [10.3102/1076998619832248](https://doi.org/10.3102/1076998619832248).
- [15] M. W. Liemohn et al., Model evaluation guidelines for geomagnetic index predictions, *Space Weather*, vol. 16, no. 12, pp. 2079–2102, 2018, doi: [10.1029/2018SW002067](https://doi.org/10.1029/2018SW002067).
- [16] E. Uzunhisarcıklı, E. Kavuncuoğlu, and A. T. Özdemir, Investigating classification performance of hybrid deep learning and machine learning architectures on activity recognition, *Comput. Intell.*, vol. 38, no. 4, Art. no. 4, 2022, doi: [10.1111/coin.12517](https://doi.org/10.1111/coin.12517).
- [17] E. Kavuncuoğlu, E. Uzunhisarcıklı, B. Barshan, and A. T. Özdemir, Investigating the performance of wearable motion sensors on recognizing falls and daily activities via machine learning, *Digit. Signal Process.*, p. 103365, Dec. 2021, doi: [10.1016/J.DSP.2021.103365](https://doi.org/10.1016/J.DSP.2021.103365).
- [18] M. Ş. Turan and B. Barshan, Classification of fall directions via wearable motion sensors, *Digit. Signal Process.*, p. 103129, Jun. 2021, doi: [10.1016/j.dsp.2021.103129](https://doi.org/10.1016/j.dsp.2021.103129).
- [19] A. T. Özdemir, An analysis on sensor locations of the human body for wearable fall detection devices: Principles and practice, *Sens. Switz.*, vol. 16, no. 8, Art. no. 8, Jul. 2016, doi: [10.3390/s16081161](https://doi.org/10.3390/s16081161).
- [20] D. C. Montgomery, E. A. Peck, and G. G. Vining, *Introduction to linear regression analysis*. John Wiley & Sons, 2013.

- [21] J. S. Bendat and A. G. Piersol, Random data: analysis and measurement procedures. John Wiley & Sons, 2011.
- [22] J. L. Devore, Probability and statistics for engineering and the sciences. Cengage Learning, 2015.
- [23] N. L. Johnson, S. Kotz, and N. Balakrishnan, Continuous univariate distributions, Vol. 1, 2nd edition. New York: Wiley-Interscience, 1994.
- [24] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, Discrete-time signal processing. Pearson, 2010.
- [25] J. G. Proakis and D. G. Manolakis, Digital signal processing: principles, algorithms, and applications. Macmillan, 1992.
- [26] Signal processing, in biomechanics and motor control of human movement, John Wiley & Sons, Ltd, 2009, pp. 14–44. doi: 10.1002/9780470549148.ch2.
- [27] P. J. Brockwell and R. A. Davis, Introduction to time series and forecasting, in Springer Texts in Statistics. Cham: Springer International Publishing, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-29854-2.
- [28] T. Inouye et al., Quantification of eeg irregularity by use of the entropy of the power spectrum, Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol., vol. 79, no. 3, pp. 204–210, Sep. 1991, doi: 10.1016/0013-4694(91)90138-T.
- [29] G. H. Golub and C. F. V. Loan, Matrix computations. JHU Press, 2013.
- [30] A. Mannini and A. M. Sabatini, Machine learning methods for classifying human physical activity from on-body accelerometers, Sensors, vol. 10, no. 2, Art. no. 2, Feb. 2010, doi: 10.3390/s100201154.
- [31] T. M. Cover and J. A. Thomas, Elements of information theory. John Wiley & Sons, 2012.
- [32] T. Hastie, R. Tibshirani, and J. Friedman, Overview of supervised learning, in the elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction, T. Hastie, R. Tibshirani, and J. Friedman, Eds., in Springer Series in Statistics. , New York, NY: Springer, 2009, pp. 9–41. doi: 10.1007/978-0-387-84858-7_2.
- [33] C. J. C. Burges, A tutorial on support vector machines for pattern recognition, Data Min. Knowl. Discov., vol. 2, no. 2, pp. 121–167, Jun. 1998, doi: 10.1023/A:1009715923555.
- [34] H. T. Babacan, Ö. Yüksek, and F. Saka, Yapay zeka ve sezgisel regresyon yöntemlerinin yağış-akış modellemesi için performans değerlendirmesi: Aksu Deresi için bir uygulama, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendis. Bilim. Derg., vol. 11, no. 3, Art. no. 3, Jul. 2022, doi: 10.28948/ngumuh.1079616.
- [35] L. Breiman, Random forests, Mach. Learn., vol. 45, no. 1, pp. 5–32, Oct. 2001, doi: 10.1023/A:1010933404324.
- [36] J. H. Friedman, Greedy function approximation: a gradient boosting machine, 2001.
- [37] Introduction to the logistic regression model, in Applied Logistic Regression, John Wiley & Sons, Ltd, 2013, pp. 1–33. doi: 10.1002/9781118548387.ch1.
- [38] M. Demirhan and S. Behdioğlu, Sağlık çalışanlarının maruz kaldığı şiddetin sıralı lojistik regresyon analizi ile incelenmesi, Toplum Ekon. Ve Önetim Derg., vol. 4, no. 1, Art. no. 1, Jun. 2023, doi: 10.58702/teyd.1228283.
- [39] J. Shi, D. Chen, and M. Wang, Pre-impact fall detection with cnn-based class activation mapping method, Sensors, vol. 20, no. 17, Art. no. 17, Jan. 2020, doi: 10.3390/s20174750.
- [40] S. Zulj, G. Seketa, I. Lackovic, and R. Magjarevic, Accuracy comparison of ml-based fall detection algorithms using two different acceleration derived feature vectors, in World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2018, L. Lhotska, L. Sukupova, I. Lacković, and G. S. Ibbott, Eds., in IFMBE Proceedings. Singapore: Springer, 2019, pp. 481–485. doi: 10.1007/978-981-10-9038-7_89.
- [41] C. M. Lee, J. Park, S. Park, and C. H. Kim, Fall-detection algorithm using plantar pressure and acceleration data, Int. J. Precis. Eng. Manuf., vol. 21, no. 4, pp. 725–737, Apr. 2020, doi: 10.1007/s12541-019-00268-w.
- [42] H. Gjoreski et al., Wearable sensors data-fusion and machine-learning method for fall detection and activity recognition, Stud. Syst. Decis. Control, vol. 273, pp. 81–96, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-38748-8_4.
- [43] O. Ojetola, E. I. Gaura, and J. Brusey, Fall detection with wearable sensors–safe (smart fall detection), in 2011 Seventh International Conference on Intelligent Environments, Jul. 2011, pp. 318–321. doi: 10.1109/IE.2011.38.





Fındık küspesi ve kahve atığından aktif karbon üretimi ve karakterizasyonu

Activated carbon production and characterization from hazelnut bagasse and coffee waste

Derya Yıldız^{1,*} 

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 26040, Eskişehir Türkiye

Öz

Aktif karbon, çok geniş kullanım alanına sahip, gözenekli karbonlu bir malzemedir. Doğal ve tarımsal kaynaklardan elde edilen aktif karbonlar daha düşük maliyetli ve sürdürülebilirdir. Bu nedenle biyokütleden sentezlenen aktif karbonlar üzerine yapılan çalışmalar artmıştır. Bu çalışmada, fındık küspesi ve atık kahve telvesi gibi atık olarak nitelendirilen kaynakların aktif karbon olarak değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Fındık küspesi ve kahve atığından, ZnCl₂ kimyasal aktivasyonu ile 2:1, 3:1 emdirme oranlarında ve 400°C, 500°C, 600°C karbonizasyon sıcaklıklarında aktif karbon üretilmiştir. Aktif karbonların yüzey özelliklerini belirlemek üzere BET, SEM-EDS ve FTIR analizleri gerçekleştirilmiştir. Fındık küspesinden elde edilen aktif karbonlarda en yüksek yüzey alanı 846 m²/g olarak 3:1 emdirme oranında ve 500°C sıcaklıkta elde edilmiştir. En büyük toplam gözenek hacmi ise 0.645 cm³/g olarak elde edilmiştir. Atık kahveden elde edilen aktif karbonlarda ise en yüksek yüzey alanı 747.5 m²/g olarak 3:1 emdirme oranında ve 500 °C sıcaklıkta elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Fındık küspesi, Kahve atığı, Kimyasal aktivasyon, Aktif karbon

1 Giriş

Aktif karbonlar çoğunlukla çevresel atıklardan üretilen yüksek karbon içeriğine, geniş iç gözenek yapısına sahip saflaştırılmış bir çeşit kömürdür [1]. Aktif karbonlar sıvıların ve gazların saflaştırılmasında, toksik maddelerden korunmada, çözücü geri kazanımında, renk gideriminde, katalizör desteği olarak, elektrot olarak süper kapasitörlerde ve gaz depolama gibi endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [2–6]. Aktif karbonların adsorptif kapasiteleri karbonun yüzey ve gözenek özellikleriyle ilişkilidir. Ek olarak, iç gözenek yapısı, yüzey özellikleri, yüzey reaktivitesi ve yüzeylerindeki fonksiyonel grupların varlığı moleküllerin aktif karbon tarafından adsorplanma mekanizmasında önemli etkenlerdir.

Son yıllarda biyokütleden üretilen yüksek yüzey alanlı aktif karbonların enerji depolama sistemlerinde ve farklı adsorpsiyon uygulamalarında kullanılmasına yönelik yapılan çalışmalar hız kazanmıştır [7,8]. Aktif karbon üretimi için biyokütle kaynağı olarak çeşitli meyvelerin kabuk ve çekirdekleri; ağaçlar; tarımsal fabrika atıkları; fındık, ceviz, fıstık vb. kabukları gibi pek çok seçenek

Abstract

Activated carbon is a porous material with a wide range of applications. Activated carbons derived from natural and agricultural sources are more cost effective and sustainable. Therefore, studies on activated carbons synthesized from biomass have increased. The aim of this study was to utilize waste resources such as hazelnut meal and waste coffee grounds as activated carbon. Activated carbons with impregnation ratios of 2:1, 3:1 and carbonization temperatures of 400°C, 500°C, 600°C were prepared from hazelnut bagasse and coffee waste by chemical activation with ZnCl₂. BET, SEM-EDS and FTIR analyses were performed to determine the surface properties of the activated carbons. The highest surface area of 846 m²/g was obtained in activated carbons obtained from hazelnut bagasse at 3:1 impregnation ratio and 500°C temperature. The largest total pore volume was obtained as 0.645 cm³/g. The highest surface area of 747.5 m²/g was obtained for the coffee waste activated carbons at 3:1 impregnation ratio and 500 °C temperature.

Keywords: Hazelnut bagasse, Waste coffee, Chemical activation, Activated carbon

bulunmaktadır. Literatürde meşe ağacı [9], denizkestanesi [10], okaliptüs ağacı atığı [11], zeytin ağacı [12], ceviz ağacı, kavak ağacı [13], hindistan cevizi ağacı talaşı [14], mango çekirdeği [15], fındık kabuğu [16], mısır sapı [17], pamuk sapı [18], pirinç kabuğu [19], kahve telvesi [20], şeker kamışı kabuğu [21] gibi pek çok doğal kaynaklı biyokütleden elde edilen yüksek yüzey alanı ve gözenekliliğe sahip aktif karbonlar ile yapılmış çeşitli çalışmalar mevcuttur.

Biyokütleden aktif karbon üretimi iki aşamada gerçekleştirilir: aktivasyon ve karbonizasyon. Aktivasyon ile malzemenin, fizikokimyasal özellikleri (yüzey alanı, gözeneklilik, gözenek hacmi ve çapı) geliştirilir. Fiziksel aktivasyon, hammaddenin karbonizasyonu ve karbonize olmuş yapının aktivasyonu olmak üzere iki aşamadan oluşur. Karbonizasyon esnasında oksijen ve hidrojen atomlarının hammaddeden uzaklaştırılmasıyla gözenekli bir yapıya sahip olan karbon iskeleti elde edilir. Aktivasyon işleminde karbonca zenginleştirilmiş hammaddenin oksidan bir ortamda işlem görmesi sonucunda yapıdaki karbonun yanmasıyla ortaya çıkan uçucu bileşenlerin ortamdan uzaklaşması ile gözenek hacmi ve yüzey alanının büyük

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: dozcan@ogu.edu.tr (D. Yıldız)

Geliş / Received: 07.08.2023 Kabul / Accepted: 14.02.2024 Yayınlanma / Published: 15.04.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1339138

oranda artması sağlanmaktadır [22]. Kimyasal aktivasyonda hammaddeye öncelikle fosforik asit (H_3PO_4), çinko klorür ($ZnCl_2$), potasyum hidroksit (KOH) gibi aktifleştirici bir madde ile emdirme işlemi uygulanır [23]. Daha sonra numune azot atmosferi altında karbonize edilir. Kimyasal aktivasyon ile elde edilen aktif karbonların fiziksel aktivasyona göre oldukça yüksek gözenekliliğe ve daha spesifik uygulama alanına sahip olduğu bilinmektedir [24]. Aktif karbon oluşumu sırasında karbonizasyon sıcaklığının artması ile hammaddeden öncelikle CH_4 , CH_3OH , H_2O , CO_2 gibi küçük moleküller gaz faza geçerek ayrılır. Yapıdan ayrılırken artan basınçları sayesinde mikro kanallar açarlar. Moleküllerin yapıdan ayrıldığı yerde ise mikrogözenekler oluşur [25].

Kömür, petrol yan ürünleri gibi kaynaklardan üretilen ticari aktif karbonlar yerine tarımsal kaynaklardan elde edilen aktif karbonların daha düşük maliyetli ve yenilenebilir olması nedeniyle biyokütleden elde edilen aktif karbonlar üzerine yapılan çalışmalar yoğunlaşmıştır. Thithai vd [26], çalışmalarında hammaddede olarak kahve atığı ve boş meyve salkımları kullanmıştır. KOH, $ZnCl_2$ ve H_3PO_4 aktivasyonu ile ağırlıkça 1:0, 1:1, 1:3 emdirme oranında ve 600 - 800 °C karbonizasyon sıcaklıklarında aktif karbonlar üretilmiştir. Üretilen aktif karbonların en yüksek verimleri 600 °C' de 1:3 emdirme oranında H_3PO_4 ile kahve atıkları için %45.20 ve boş meyve salkımı için % 48 olarak gözlenmiştir. Ancak maksimum özgül yüzey alanı kahve atığı ve boş meyve salkımı aktif karbonları için 800 °C' de sırasıyla 3068 m²/g ve 2147 m²/g elde edilmiştir. Ürünlerin spesifik özellikleri ile bu yöntemin ve atık biyokütlenin aktif karbon üretimi için uygun olabileceğini düşündürmüştür. Demiral vd., [27] çalışmalarında, $ZnCl_2$ ve KOH ile fındık küspesinden aktif karbon sentezlemişlerdir. Karbonizasyon işlemi, azot akışı altında 2 saat boyunca 500, 600 ve 700 °C' de gerçekleştirilmiştir. Aktif karbonların yüzey özellikleri belirlenmiştir. Aktif karbonların en yüksek yüzey alanları 1642 ve 1489 m²/g ve toplam gözenek hacimleri 0.964 cm³/g ve 0.9329 cm³/g'dır. Saka vd.,[28] çalışmalarında fındık küspesinin kimyasal aktivasyonu ile aktif karbon üretmiş, BET yüzey alanı 548 m²/g, toplam gözenek hacmi ise 0.367 cm³/g bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre fındık küspesinden ve kahve atığından kimyasal aktivasyonla hazırlanan karbonların yüksek yüzey alanına ve gözenekliliğe sahip olduğu görülmüştür. Fındık küspesinden aktif karbon üretilen çalışma sayısı oldukça sınırlıdır.

Türkiye biyokütle kaynağı açısından zengin bir ülkedir. Fındığın Türkiye'de üretimi fazladır. TÜİK Bitkisel Üretim İstatistikleri' ne göre 2021 yılında Fındık üretimi 684 bin ton olarak gerçekleşmiştir. Yağ endüstrisinde fındık yağı alındıktan sonra kalan fındık küspesi genellikle hayvan yemi olarak değerlendirilir. Bu kaynağın aktif karbon üretiminde değerlendirilmesi ile farklı bir potansiyeli olabileceği düşünülmektedir. Bunun yanında ülkemizde ve dünyada çok fazla tüketilen ve demleme sonrası telvesi atık olarak atılan kahvenin biyokütle potansiyelinin de değerlendirilmesi için kullanımının uygun olduğuna karar verilmiştir. Çalışmamızda fındık küspesi ve atık kahveden $ZnCl_2$ aktivasyonu ile aktif karbonlar üretilmiştir. Kaya [29] atık kahve telvesinden H_3PO_4 , KOH ve $ZnCl_2$ kullanarak aktif

karbon üretmiştir. Farklı emdirme oranı ve sıcaklıklarda ürettiği karbonları $NaBH_4$ metanoliz reaksiyonunda katalizör olarak kullanmıştır. En iyi katalitik aktiviteyi fosforik asit aktivasyonlu karbon göstermiştir. Bu karbonun yüzey alanı 686.124 m²/g bulunmuştur. Kante vd., [30] ise atık kahve telvesinden $ZnCl_2$ aktivasyonu ile ürettiği aktif karbonu hidrojen sülfürün havadan ayrılması için kullanmıştır. Kim vd., [31] çalışmalarında atık kahve telvesinden hidrotermal karbonizasyon ile elde ettikleri karbonun yakıt özelliklerini incelemiştir. Atık kahve ve fındık küspesinden H_3PO_4 aktivasyonu ile aktif karbon üretimi karşılaştırmalı olarak ilk kez bu çalışmada yapılmıştır. Üretilen aktif karbonların karakterizasyonları yapılarak yüzey özellikleri belirlenmiştir.

2 Materyal ve metot

2.1 Hammaddenin hazırlanması

Bu çalışmadaki fındık küspesi (fındık yağı alındıktan sonra kalan kuru küspe) Afyon' da bulunan bir yağ fabrikasından, kahve atığı ise Eskişehir Osmangazi Üniversitesi kampüsü içerisinde bulunan bir kahve dükkânından temin edilmiştir. Fındık küspesi kuru olarak temin edilmiştir. Kahve atıkları ise önce laboratuvar ortamında sonra etüvde 85°C'de 24 saat kurutulmuştur. Temin edilen hammaddeler elek analizi yapılarak 0.224-1,8 mm boyutlara ayrılmış ve 0.4 mm<Dp<0.6 mm tanecik boyutu aralığındaki örnekler aktif karbon sentezi için kullanılmıştır. Biyokütle olarak seçilen fındık küspesi ve atık kahvenin nem, kül, uçucu madde miktar tayini, sabit karbon miktar tayini, ham selüloz miktar tayini, ekstraktif madde miktar tayini, lignin miktar tayini yapılmıştır.

2.2 Aktif karbonun hazırlanması

Fındık küspesi ve atık kahve, $ZnCl_2$ kullanılarak kimyasal aktivasyon yöntemi ile aktive edilmiştir. Deneylerde kütlece kimyasal madde/biyokütle oranları 2:1, 3:1 olarak belirlenmiştir. 20' şer gram hammaddede, her bir emdirme oranı için belirlenen miktarda $ZnCl_2$ içeren 800 mL sulu çözeltiye konularak ısıtıcı manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Karıştırma süresi 4 saat, sıcaklık 70°C' dir. Emdirme işleminin ardından sulu çözelti süzülerek 85°C sıcaklığındaki etüvde 24 saat kurutulmuştur. Karbonizasyon işleminin gerçekleştirildiği reaktörde bütün deneyler için ısıtma hızı 10 °C/dk ve N_2 akış hızı 0.2 L/dk olarak belirlenmiştir. Karbonizasyon işlemi 1'er saat süre ile her bir emdirme oranı için sırası ile 400, 500 ve 600°C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. 1 saat sonunda reaktör azot gazı akışı altında soğutulmuştur.

2.3 Aktif karbonun karakterizasyonu

Aktif karbonların yüzey özellikleri BET analizi ile 77 K' de N_2 adsorpsiyon-desorpsiyon izotermeleri alınarak belirlenmiştir. Ayrıntılı karakterizasyon koşulları daha önceki [28] çalışmamızda belirtilmiştir. Numunelerin yüzey morfolojisi Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) cihazı ile belirlenmiştir. Aktif karbonun fonksiyonel gruplarının belirlenmesi için Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi (FT-IR) analizi yapılmıştır. Aktif

karbonların elementel analizi Enerji Dispersive Spektroskopi (EDS) cihazı ile yapılmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Hammaddenin karakterizasyonu

Biyokütlelere yapılan kaba analiz sonuçlarına göre; fındık küspesinin %43.2 selüloz (TS 324), %7.6 nem (ASTM-D 4442-92), %5.8 kül (ASTM D-1102-84), %70.22 uçucu madde (ASTM E-872-82), %16.38 sabit karbon içerdiği belirlenmiştir. Atık kahvenin ise %44.5 selüloz, %6.3 nem (ASTM-D 4442-92), %1.5 kül (ASTM D-1102-84), %76.5 uçucu madde (ASTM E-872-82) ve %15.7 sabit karbon içerdiği belirlenmiştir. Nem, kül ve uçucu madde miktarı toplamı 100'den çıkarılarak sabit karbon miktarı kütle denkliliğinden hesaplanmıştır.

3.2 Aktif karbonların karakterizasyonu

Çinko klorür aktivasyonu ile üretilen aktif karbonların BET analizi sonucu elde edilen yüzey özellikleri Tablo 1 ve 2' de verilmiştir.

Tablo 1. Fındık küspesinden üretilen aktif karbonların yüzey özellikleri

Emdirme Oranı	T (°C)	S _{BET} (m ² /g)	V _{mik} (cm ³ /g)	V _{top} (cm ³ /g)	V _{mezo} (cm ³ /g)	D _p (Å)
2/1	400	119	0.034	0.169	0.135	56.59
	500	393	0.149	0.303	0.154	32.2
	600	14.11	0.0014	0.0599	0.058	170
3/1	400	551	0.208	0.464	0.256	26.39
	500	846	0.318	0.645	0.327	30.49
	600	186	0.0543	0.289	0.234	61.97

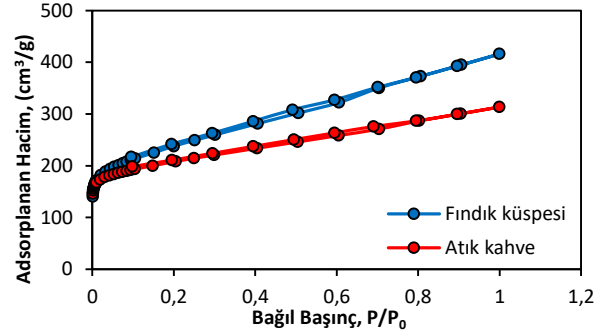
Tablo 1' de yer alan aktif karbonların BET analizlerine göre 3:1 emdirme oranında 500°C' de en yüksek spesifik yüzey alanı 846 m²/g ve en büyük toplam gözenek hacmi 0.645 cm³/g olarak elde edilmiştir. Fındık küspesinden elde edilen aktif karbonlarda maksimum yüzey alanları her iki emdirme oranı için de 500°C' de elde edilmiştir.

Tablo 2. Atık kahveden üretilen aktif karbonların yüzey özellikleri

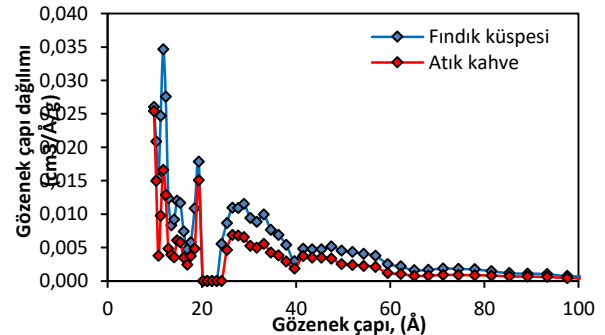
Emdirme Oranı	T (°C)	S _{BET} (m ² /g)	V _{mik} (cm ³ /g)	V _{top} (cm ³ /g)	V _{mezo} (cm ³ /g)	D _p (Å)
2/1	400	370	0.142	0.286	0.144	30.91
	500	538	0.21	0.324	0.114	24.07
	600	248	0.13	0.254	0.124	31.02
3/1	400	628	0.243	0.437	0.194	27.84
	500	747.5	0.291	0.486	0.195	26.02
	600	327	0.125	0.264	0.139	32.36

Tablo 2' de atık kahveden elde edilen aktif karbonların BET analizi sonuçları verilmiştir. Buna göre 3:1 emdirme oranında 500°C' de yüzey alanı 747.5 m²/g' a ulaşmıştır. En büyük toplam gözenek hacmi ise yine 3:1 emdirme oranında 0.486 cm³/g olarak elde edilmiştir. Çinko klorür aktivasyonu ile üretilen aktif karbonlarda, yüksek sıcaklıklarda yüksek miktarda uçucu madde kaybı olmasının, bazı gözeneklerin daralmasının ve karbon yapısının büzülmesinin yüzey alanı ve gözenek yapısının bozulmasına neden olduğu bilinmektedir [32]. Bu çalışmada da her iki biyokütle

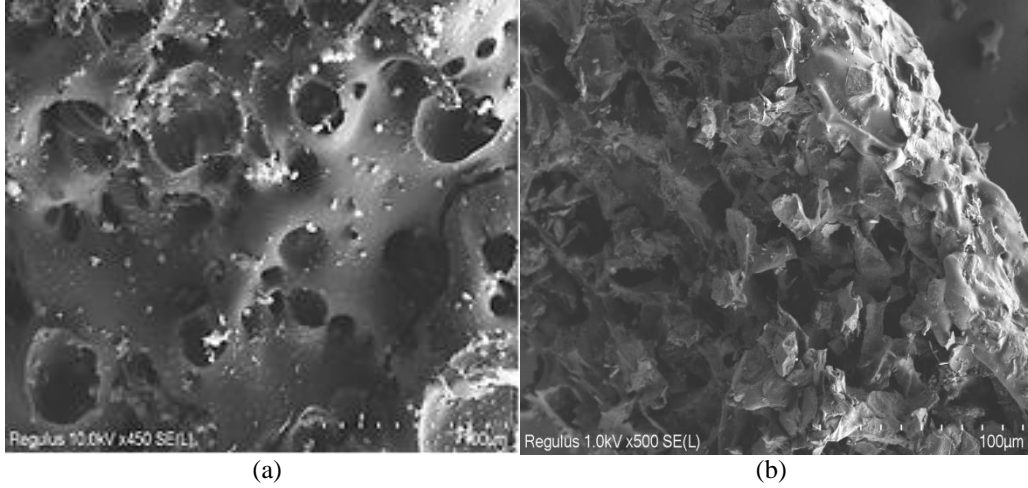
kaynağı için sıcaklığın 600°C' ye yükselmesi ile yüzey alanında ve gözeneklilikte belirgin bir düşüş gözlenmiştir. Aynı şekilde 400°C' de de yüzey alanı ve gözenek hacmi düşüktür. Sıcaklığın düşük olması yapıdan daha az uçucu madde uzaklaşmasına ve gözenek oluşumunun azalmasına neden olmuştur. Emdirme oranının artması ise aktif karbonun yüzey alanının ve gözenek hacminin artmasını sağlamıştır. Fındık küspesinin aktivasyonu için 2:1 emdirme oranı düşüktür ve 600°C sıcaklık ise yüksektir. Düşük emdirme oranında yeterince aktivasyon ajanı bulunmadığından yeni bağların kurulması yeni gözeneklerin oluşması azalmıştır. Bunun yanı sıra sıcaklığında yüksek olması küçük ve dayanıksız olan gözeneklerin çökmesine neden olmuştur. Bunun neticesinde büyük gözenek boyutuna sahip, düşük yüzey alanlı aktif karbon elde edilmiştir. ZnCl₂ aktivasyonu ile üretilen aktif karbonlarda her iki biyokütle kaynağı için de optimum emdirme oranı ağırlıkça 3:1 ve sıcaklık 500°C olarak belirlenmiştir. Bu koşullarda üretilen karbonların N₂ adsorpsiyon/desorpsiyon izotermeleri Şekil 1' de verilmiştir. Görüldüğü gibi 3:1 emdirme oranında ve 500°C sıcaklığındaki aktif karbonların izotermeleri daha çok mikro ve mezo gözenekli yapıları temsil eden Tip IV izotermine uygundur. Ma vd. [20] de yaptıkları çalışmada atık kahve telvesinden fosforik asit aktivasyonu ile ürettikleri aktif karbonun yüzey alanını 1110 m²/g bulmuştur. İzoterm modeli ise Tip IV olarak belirlemişlerdir. İzotermelerde histeresis halkalarının olması da yapının mikro ve mezo gözeneklerden oluştuğunu göstermektedir. Fındık küspesinden üretilen aktif karbonun daha gözenekli ve yüzey alanının daha yüksek olması neticesinde adsorplanan gaz hacmi de atık kahveden üretilen karbone göre daha yüksektir. Şekil 2' de ise aktif karbonların gözenek boyut dağılımları sunulmuştur.



Şekil 1. Aktif karbonların N₂ adsorpsiyon/desorpsiyon izotermeleri



Şekil 2. Aktif karbonların gözenek boyut dağılımı



Şekil 3. Aktif karbonların (a) Fındık küspesi (b) Atık kahve SEM görüntüleri

Aktif karbonlarda, gözenek çapı dağılımının yoğun olarak 10-20 Å aralığında olduğu gözlenmiştir. Her iki hammaddeden üretilen aktif karbonlar mikro ve mezo gözenekli yapı sergilemiştir. Genel olarak elde edilen tüm aktif karbonlarda ağırlıklı olarak mikro gözenekli yapı olmakla birlikte mezo gözenekli yapı da gözlenmiştir. S_{BET} yüzey alanı ve izoterm eğrileri de bu sonucu desteklemiştir. Şekil 3'te optimum koşullarda üretilen aktif karbonların SEM görüntüleri verilmiştir. Aktif karbonların gözenekli bir yapıda olduğu ve gözeneklerin aktif karbon yüzeyinden içeriye doğru devam ettiği ve gözeneklerin birbirine bağlı olmadığı görülmektedir. Kahve atığından elde edilen aktif karbonun yüzeyinin daha girintili olduğu görülmektedir.

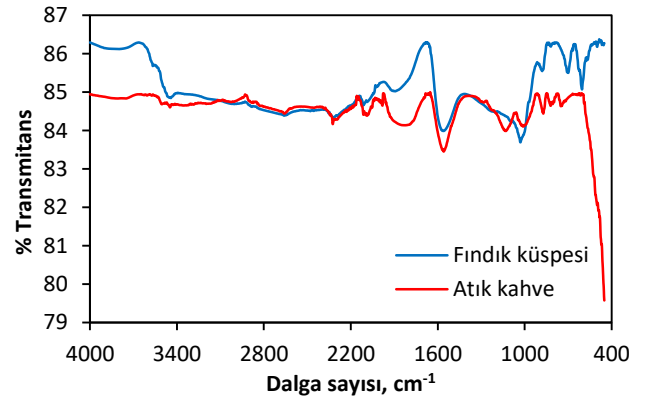
Tablo 3'te karbonların EDS sonuçları verilmiştir. Tablo 3'te verilen EDS sonuçlarına göre en yüksek karbon yüzdesi atık kahveden üretilen karbonda gözlenmiştir. Her iki karbonunda yüzeyinde aktivasyon ajanına bağlı olarak bulunan Zn ve Cl elementleri gözlenmiştir. Bu da aktivasyon işlemi ile $ZnCl_2$ 'ün karbon yüzeyine bağlandığını göstermiştir. Aktif karbonların Şekil 4'te verilen FTIR spektrumlarında da bu grupların yüzeyde bağlı bulunduğu belirlenmiştir. Şekil 4'te verilen FTIR spektrumları benzer çıkmıştır.

Tablo 3. Aktif karbonların EDS analiz sonuçları

Element	Ağırlıkça Yüzde	
	Fındık küspesi	Atık kahve
C	73.47	86.21
N	5.68	1.94
O	6.68	3.44
Zn	11.28	4.51
Cl	2.89	3.90

Aktif karbonların FT-IR spektrumlarında 3400 cm^{-1} 'de bantlar, O-H bağ titreşimidir, sudaki hidrojen bağının varlığını gösterir [33-35]. $1800-2800\text{ cm}^{-1}$ arasındaki bantlar ise aktif karbonların yüzeylerindeki aldehitlerin, karbonillerin, karboksilik asitlerin ve esterlerin varlığını gösterir [15]. Görülen bu pikler aldehit, keton, karboksil ve lakton gruplarından kaynaklı C=O gerilme titreşimidir veya

$-N=C=O$ ve $C=C=C$ çift bağlarına atanmıştır [33]. $1580-1550\text{ cm}^{-1}$ aralığındaki bant aromatik halkalardaki C-C bağlarının gerilimidir [36,37] ve her iki karbonda da mevcuttur. 1000 cm^{-1} civarındaki bantlar fenoller, alkoller ve eterlerde gerilmiş C bağlarından kaynaklanmaktadır [38]. 559 cm^{-1} ve 997 cm^{-1} arasındaki daha zayıf bantlar C-H bağlarına ait titreşimlerdir ve aromatik yapıları temsil ettiği belirtilmiştir [39] veya $600-900\text{ cm}^{-1}$ aralığındaki piklerin, halojenli bileşiklerde C-Cl suşundan kaynaklanabileceği gösterilmiştir [33].



Şekil 4. Aktif karbonların FTIR spektrumları

4 Sonuçlar

Bu çalışmada biyokütle atıklarından aktif karbon üretimi ile ucuz, etkili ve sürdürülebilir aktif karbon üretimi amaçlanmıştır. Fındık küspesi ve atık kahveden $ZnCl_2$ aktivasyonu ile farklı emdirme oranlarında ve farklı sıcaklıklarda aktif karbonlar üretilerek emdirme oranı ve karbonizasyon sıcaklığının yüzey özelliklerine etkisi incelenmiştir. Üretilen aktif karbonlardan yüzey alanı yüksek olanlar için N_2 adsorpsiyon/desorpsiyonu, FTIR ve SEM-EDS analizleri ile yapılmıştır. N_2 gazı adsorpsiyonu ile yüzey özellikleri belirlenen aktif karbonların en uygun karbonizasyon sıcaklığının 500 °C olduğu ve en iyi emdirme oranının ise kütlece 3:1 aktivasyon ajanı/biyokütle oranı

olduğu belirlenmiştir. Artan emdirme oranı karbonların yüzey alanında ve gözenek hacminde artışa sebep olurken, her emdirme oranı için artan sıcaklık ile gözenek yapısının bozulması nedeniyle aktif karbonların spesifik yüzey alanları ve toplam gözenek hacimleri azalmıştır. $ZnCl_2$ aktivasyonu ile fındık küspesinden üretilen aktif karbonda gözenek hacmi $0.645 \text{ cm}^3/\text{g}$ ' a ulaşırken maksimum spesifik yüzey alanı $846 \text{ m}^2/\text{g}$ olarak bulunmuştur. Atık kahveden üretilen aktif karbonda ise maksimum yüzey alanı $747.5 \text{ m}^2/\text{g}$ ve gözenek hacmi $0.486 \text{ cm}^3/\text{g}$ olarak belirlenmiştir. Her iki karbon için de optimum karbonizasyon koşulu maksimum yüzey alanı ve gözenek hacmini veren 3:1 emdirme oranı ve 500°C sıcaklık olarak belirlenmiştir. Aktif karbonların gözenek boyut dağılımlarının 10 ila 20 Å aralığında yoğunlaştığı, karbonların mikro ve mezo gözenekli yapı sergilediği belirlenmiştir. Aktif karbonların N_2 adsorpsiyon izotermi, Tip IV izotermi ile uygun olup, mikro ve mezo gözenekli yapı göstermiştir. SEM görüntüleri alınarak aktif karbon yüzeyinin düzensiz girintili ve gözenekli bir yapıda olduğu görülmüştür. EDS analizi ile fındık küspesinden üretilen karbonun %73.47 ve atık kahveden üretilen karbonun ise %86.21 karbon yüzdesine sahip olduğu belirlenmiştir. Aktif karbonların yüzey fonksiyonel grupları FTIR spektrumları analiz edilerek belirlenmiştir ve birbirleri ile benzerlik göstermiştir. Aktif karbonlar genel olarak alkol, fenol, eter, ester, karbonil ve karboksil grupları, aromatikler, aldehytler ve $ZnCl_2$ ' den ileri gelen grupları içermektedir. $ZnCl_2$ aktivasyonunun aktif karbonun yapısında gözenekliliğe sebep olduğu, yüzey alanını arttırdığı ve hammaddenin yapısındaki mevcut bağların bozulmasına sebep olarak farklı kimyasal bağların oluşmasına yol açtığı gözlenmiştir. Bu sonuçlar ışığında atık olarak nitelendirilen fındık küspesi ve kahve telvesinden aktif karbon üretilerek daha değerli malzemeler haline getirilebileceği görülmüştür. Fındık küspesi ve atık kahve gibi biyokütleden üretilen aktif karbonların yüzey özelliklerinin geliştirilmesi için KOH gibi farklı aktivasyon ajanları kullanılabilir. Bunun yanı sıra zeolit gibi farklı gözenekli malzemeler ile kompozit yapılarak bileşenlerinin sinerjik etkisinden yararlanılabilir. Çeşitli metaller eklenerek aktif karbonlar katalizör desteği olarak kullanılabilir. Üretilen aktif karbonların yüzey özellikleri sayesinde arıtım teknolojileri, enerji depolama sistemleri gibi birçok kullanım alanında uygulamasının yapılabileceği düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FHD-2021-1717 kodu ile desteklenen proje kapsamında yapılmıştır.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %12

Kaynaklar

[1] R. C. Bansal and M. Goyal, Activated Carbon Adsorption. CRC Press, 2005.

- [2] Y. Ji, T. Li, L. Zhu, X. Wang, and Q. Lin, Preparation of activated carbons by microwave heating KOH activation, Applied Surface Science, 254, (2), 506–512, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.06.034>
- [3] J. Bedia, J. M. Rosas, D. Vera, J. Rodríguez-Mirasol, and T. Cordero, Isopropanol decomposition on carbon based acid and basic catalysts, Catalysis Today, 158, (1–2), 89–96, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2010.04.043>
- [4] T. Vernersson, Arundo donax cane as a precursor for activated carbons preparation by phosphoric acid activation, Bioresource Technology, 83, 2, 95–104, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00205-X](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00205-X)
- [5] Y. Ding et al., A novel approach for preparing in-situ nitrogen doped carbon via pyrolysis of bean pulp for supercapacitors, Energy, 216, 119227, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119227>
- [6] C. A. Okonkwo, M. C. Menkiti, I. A. Obiora-Okafo, and O. N. Ezenwa, Controlled pyrolysis of sugarcane bagasse enhanced mesoporous carbon for improving capacitance of supercapacitor electrode, Biomass and Bioenergy, 146, 105996, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.105996>
- [7] P. Ozpinar et al., Activated carbons prepared from hazelnut shell waste by phosphoric acid activation for supercapacitor electrode applications and comprehensive electrochemical analysis, Renewable Energy, 189, 535–548, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.126>
- [8] S. Kaya et al., Enhanced hydrogen production via methanolysis and energy storage on novel poplar sawdust-based biomass-derived activated carbon catalyst, J Appl Electrochem, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10800-023-01873-4>
- [9] S. A. Borghei et al., Synthesis of multi-application activated carbon from oak seeds by KOH activation for methylene blue adsorption and electrochemical supercapacitor electrode, Arabian Journal of Chemistry, 14, (2), 102958, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.102958>
- [10] B. Gezer, Ultrases Yöntemi İle Hazırlanan Deniz Kestanesinden Elde Edilen Aktif Karbon İle Cu (II) Adsorpsiyonu, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9, (2), 770-780, 2020. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.700773>
- [11] Q. Han, J. Wang, B. A. Goodman, J. Xie, and Z. Liu, High adsorption of methylene blue by activated carbon prepared from phosphoric acid treated eucalyptus residue, Powder Technology, 366, 239–248, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.02.013>
- [12] A. Mamani, N. Ramirez, C. Deiana, M. Gimenez, and F. Sardella, Highly microporous sorbents from lignocellulosic biomass: Different activation routes and their application to dyes adsorption, Journal of Environmental Chemical Engineering, 7, (5), 103148, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103148>
- [13] B. Heibati et al., Kinetics and thermodynamics of enhanced adsorption of the dye AR 18 using activated

- carbons prepared from walnut and poplar woods, *Journal of Molecular Liquids*, 208, (99–105), 2015. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2015.03.057>
- [14] K. Selvi, Removal of Cr(VI) from aqueous solution by adsorption onto activated carbon, *Bioresource Technology*, 80, (1), 87–89, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00068-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00068-2)
- [15] M. K. Rai et al., Removal of hexavalent chromium Cr (VI) using activated carbon prepared from mango kernel activated with H₃PO₄, *Resource-Efficient Technologies*, 2, S63–S70, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.reffit.2016.11.011>
- [16] E. Demirbas, N. Dizge, M. T. Sulak, and M. Kobya, Adsorption kinetics and equilibrium of copper from aqueous solutions using hazelnut shell activated carbon, *Chemical Engineering Journal*, 148, (2–3), 480–487, May 2009, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.09.027>
- [17] J. Zhao, L. Yu, H. Ma, F. Zhou, K. Yang, and G. Wu, Corn stalk-based activated carbon synthesized by a novel activation method for high-performance adsorption of hexavalent chromium in aqueous solutions, *Journal of Colloid and Interface Science*, 578, 650–659, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.06.031>
- [18] K. Li, Z. Zheng, and Y. Li, Characterization and lead adsorption properties of activated carbons prepared from cotton stalk by one-step H₃PO₄ activation, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 181, (1–3), 440–447, Sep. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.05.030>
- [19] I. Rahman, B. Saad, S. Shaidan, and E. Syarizal, Adsorption characteristics of malachite green on activated carbon derived from rice husks produced by chemical–thermal process, *Bioresource Technology*, 96, (14), 1578–1583, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.12.015>
- [20] X. Ma and F. Ouyang, Adsorption properties of biomass-based activated carbon prepared with spent coffee grounds and pomelo skin by phosphoric acid activation, *Applied Surface Science*, 268, 566–570, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.01.009>
- [21] L. Giraldo-Gutiérrez and J. C. Moreno-Piraján, Pb(II) and Cr(VI) adsorption from aqueous solution on activated carbons obtained from sugar cane husk and sawdust, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 81, (2), 278–284, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2007.12.007>
- [22] D. Yıldız, Orman biyokütlesinden (paulownia elongota ağacı) aktif karbon ve katalitik piroliz ile biyoyakıt üretiminin incelenmesi, doctoralThesis, ESOGÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2015. Accessed: Oct. 11, 2023. [Online]. Available: <http://openaccess.ogu.edu.tr:8080/xmlui/handle/11684/502>
- [23] S. Yorgun, N. Vural, and H. Demiral, Preparation of high-surface area activated carbons from Paulownia wood by ZnCl₂ activation, *Microporous and Mesoporous Materials*, 122, (1–3), 189–194, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2009.02.032>
- [24] A. Ould-Idriss et al., Preparation of activated carbons from olive-tree wood revisited. I. Chemical activation with H₃PO₄, *Fuel Processing Technology*, 92, (2), 261–265, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.05.01>
- [25] R. T. Yang, *Adsorbents: Fundamentals and Applications*. John Wiley & Sons, 2003.
- [26] V. Thithai, X. Jin, M. Ajaz Ahmed, and J.-W. Choi, Physicochemical Properties of Activated Carbons Produced from Coffee Waste and Empty Fruit Bunch by Chemical Activation Method, *Energies*, 14, (11), 3002, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14113002>
- [27] H. Demiral, İ. Demiral, F. Tümsük, and B. Karabacaköglü, Pore structure of activated carbon prepared from hazelnut bagasse by chemical activation, *Surf. Interface Anal.*, 40, (3–4), 616–619, 2008. <https://doi.org/10.1002/sia.2631>
- [28] C. Saka et al., A novel hazelnut bagasse based activated carbon as sodium borohydride methanolysis and electrooxidation catalyst, *International Journal of Hydrogen Energy*, S0360319923013848, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.261>
- [29] M. Kaya, Evaluating organic waste sources (spent coffee ground) as metal-free catalyst for hydrogen generation by the methanolysis of sodium borohydride, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, (23), 12743–12754, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.180>
- [30] K. Kante, C. Nieto-Delgado, J. R. Rangel-Mendez, and T. J. Badosz, Spent coffee-based activated carbon: Specific surface features and their importance for H₂S separation process, *Journal of Hazardous Materials*, 201–202, 141–147, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.11.053>
- [31] H.-J. Kim and S.-C. Oh, Hydrothermal Carbonization of Spent Coffee Grounds, *Applied Sciences*, 11, (14), 6542, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11146542>
- [32] D. Angin, Production and characterization of activated carbon from sour cherry stones by zinc chloride, *Fuel*, 115, 804–811, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.04.060>
- [33] H. S. Karapınar, Adsorption performance of activated carbon synthesis by ZnCl₂, KOH, H₃PO₄ with different activation temperatures from mixed fruit seeds, *Environmental Technology*, 43, (9), 1417–1435, 2022. <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1968507>
- [34] M. Kazemipour, M. Ansari, S. Tajrobehkar, M. Majdzadeh, and H. R. Kermani, Removal of lead, cadmium, zinc, and copper from industrial wastewater by carbon developed from walnut, hazelnut, almond, pistachio shell, and apricot stone, *Journal of Hazardous Materials*, 150, (2), 322–327, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.04.118>
- [35] A. Şencan, M. Karaboyacı, and M. Kılıç, Determination of lead (II) sorption capacity of hazelnut shell and activated carbon obtained from hazelnut shell activated with ZnCl₂, *Environmental Science and Pollution Research*, 22, (5), 3238–3248, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2974-9>

- [36] M. S. Shafeeyan, W. M. A. W. Daud, A. Houshmand, and A. Arami-Niya, Ammonia modification of activated carbon to enhance carbon dioxide adsorption: effect of pre-oxidation, *Applied Surface Science*, 257, (9), 3936–3942, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.11.127>
- [37] R. Hoseinzadeh Hesas, A. Arami-Niya, W. M. A. Wan Daud, and J. N. Sahu, Preparation and Characterization of Activated Carbon from Apple Waste by Microwave-Assisted Phosphoric Acid Activation: Application in Methylene Blue Adsorption, *BioResources*, 8, (2), 2950–2966, 2013. doi: 10.15376/biores.8.2.2950-2966.
- [38] H. K. Yağmur and İ. Kaya, Synthesis and characterization of magnetic ZnCl₂-activated carbon produced from coconut shell for the adsorption of methylene blue, *Journal of Molecular Structure*, 1232, 130071, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.130071>
- [39] A. Kumar and H. M. Jena, Preparation and characterization of high surface area activated carbon from Fox nut (*Euryale ferox*) shell by chemical activation with H₃PO₄, *Results in Physics*, 6, 651–658, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2016.09.012>





Çinko atıklarından çinko geri kazanımı için sülfatlayıcı kavurma ve su liçi optimizasyonu

Optimization of sulfation roasting and water leaching for zinc recovery from zinc waste

Mehmet Ali Topçu^{1,*} 

¹ Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 70200, Karaman, Türkiye

Öz

Çinko atıkları çinko üretimi için ekonomik değere sahip bir kaynaktır. Ancak, aynı zamanda içerdiği ağır metaller nedeniyle tehlikeli atık olarak da sınıflandırılırlar. Bu çalışmada sülfatlayıcı kavurma ve su liçi koşullarının metal çözünürlüğüne (Zn, Pb, Fe ve Ca) etkisi araştırılmıştır. Çeşitli sıcaklarda ve sürelerde amonyum sülfatla yapılan kavurma testleri sonrasında, kavurulmuş her bir numunenin mineralojik yapısı incelenmiştir. Kimyasal analiz sonuçlarına göre atığın %16.6 Pb, %12.5 Zn ve %7.5 Fe içerdiği tespit edilmiştir. Amonyum sülfatla ile kavurma işlemi sonunda, atığın sahip olduğu $ZnFe_2O_4$ ve Zn_2SiO_4 yapılarının çinko sülfata ($ZnSO_4$) dönüştüğü saptanmıştır. Proses ekonomisi ve enerji tasarrufu göz önüne alınarak, yaklaşık %91 oranında çinko geri kazanımı için optimum çalışma şartı, 1:2 (g:g) oranında atık/amonyum sülfat oranı, 625 °C kavurma sıcaklığı, 4 saat kavurma süresi, 25 °C liç sıcaklığı ve 2 saat liç süresi olarak belirlenmiştir. Bu şartlar altında kurşunun çözünmediği, kalsiyum ve demirin çözünme oranları sırasıyla %41.2 ve %16.8 olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Çinko atığı, Amonyum sülfat, Sülfatlayıcı kavurma, Su liçi, Metal geri kazanımı

1 Giriş

Demir dışı metaller bir ülkenin ekonomisi için temel ve stratejik hammaddelerdir ve bu nedenle ulaşım, sağlık, enerji ve elektronik endüstrisi gibi çeşitli sektörlerde geniş bir uygulama alanına sahiptirler. Ekonomik küreselleşme ve yükselen yaşam standartlarına yönelik metalik malzemelere sürekli artan talep nedeniyle demir dışı metallerin eldesi için verimli proseslerin geliştirilmesi hızla devam etmektedir [1,2]. Demir dışı metallerin çoğu sulu asitler ve alkaliler gibi çözeltiler kullanarak oksitli, sülfürlü ve silikatlı cevherleri çözmek suretiyle hidrometalurjik işlemlerle elde edilir. Değerli metalleri elde etmek için kullanılan yöntemlerin sonunda genellikle büyük miktarda pazarlanamayan ve ekonomik olmayan atıklar ortaya çıkmaktadır [3,4].

Önemli miktarda çinko, kurşun ve diğer değerli metalleri içeren hidrometalurjik çinko liç kalıntısı, sülfürik asit çözeltisi ile karbonatlı cevherlerden çinko üretiminde ortaya çıkan başlıca atık malzemedir [5,6]. Bu atıklar, depolanma

Abstract

Zinc wastes are economically valuable resource for zinc production. However, they are also classified as hazardous waste due to the heavy metal they contain. In this study, the effect of sulphating roasting and water leaching conditions on metal solubility (Zn, Pb, Fe, and Ca) were investigated. After roasting tests with ammonium sulfate at various temperatures and durations, the mineralogical structure of each roasted sample was examined. According to the chemical analysis, it was determined that the waste contained 16.6% Pb, 12.5% Zn, and 7.5% Fe. It was determined that roasting the waste with ammonium sulfate transforms the $ZnFe_2O_4$ and Zn_2SiO_4 structures of the waste into zinc sulfate ($ZnSO_4$). Considering the process economy and energy savings, the optimum operating conditions for approximately 91% zinc recovery was determined as 1:2 (g:g) waste/ammonium sulfate ratio, 625 °C roasting temperature, 4 hours roasting time, 25 °C leaching temperature, and 2 hours leaching time. Also, under the optimum conditions it was found that lead did not dissolve, and the dissolution rates of calcium and iron were 41% and 16.8%, respectively.

Keywords: Zinc waste, Ammonium sulphate, Sulfation roasting, Water leaching, Metal recovery

sebebiyle atık sahasını işgal etmekle kalmaz, aynı zamanda ağır metal içeriği nedeniyle çevreyi de tehdit eder. Çinko liç kalıntısına ilişkin endişeler yalnızca çevresel olmamakla birlikte aynı zamanda ekonomiktir. Yüksek çinko içeriğine sahip çinko liç kalıntısının atık yerine ikincil bir kaynak olarak işlenmesi, çinko cevherlerinin tükenmesi ve metal fiyatlarının hızla artması nedeniyle sürdürülebilir üretim için daha cazip bir yol haline gelmiştir [7,8]. Çinko liç atıkları genellikle ağırlıkça ortalama %10 – 12 çinko ile birlikte önemli miktarda gang içermektedir [8,9]. Bugüne kadar birçok araştırmacı, liç atığı, filtre keki, cüruf ve uçucu kül gibi çinko üretiminde ortaya çıkan atıklardan çinko geri kazanımı için çok sayıda çalışma yürütmüştür [10,11]. Çinko içerikli atıklardan çinko geri kazanımı için genellikle H_2SO_4 , HCl ve HNO_3 gibi asit içeren sulu çözeltiler sıklıkla kullanılmaktadır. Rüşen ve ark., [6] ağırlıkça %12 oranında çinko içeren liç atığından 150 g/L H_2SO_4 çözeltisi, 95 °C liç sıcaklığı, 120 dakika liç süresi ve 200 g/L katı/sıvı oranı

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: topcumali@kmu.edu.tr (M. A. Topçu)

Geliş / Received: 27.11.2023 Kabul / Accepted: 15.02.2024 Yayınlanma / Published: 15.04.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1396674

şartları altında çinko içeriğinin %71.9'nu ekstrakte etmişlerdir. Xing ve ark., [12] ağırlıkça %1.7 çinko ve %6.15 demir içeren çinko liç atığından sırasıyla %74 çinko ve %60.4 demir geri ekstraksiyonunu 200 g/L'lik sülfürik asit konsantrasyonu, 4:1 sıvı/katı oranı (ml/g), 2 saat liç süresi ve 90 °C liç sıcaklığı şartlarında elde etmişlerdir. Ajiboye ve ark., [13] düşük konsantrasyonlu nitrik asit ortamında ağırlıkça %1.2 ZnO içeren çinko içerikli atıktan %83 oranında çinko ekstrakte etmişlerdir. Çinko atıklarından değerli metallere kazanımında güçlü asitlerin çözümleri her ne kadar yüksek verim sağlasa da çinko ile birlikte yüksek oranda çözünen demir ve silisyum elementleri ileriki saflaştırma aşamalarında sorunlar meydana getirmektedir. Yüksek demir çözünürlüğü çözümlenenden demirin uzaklaştırılması için ilave prosesleri zorunlu kılmaktadır [14]. Ayrıca, asit liçinde yüksek bir silikon içeriği çözünerek çinko ile birlikte silikon jel formunda çözümlenmeye nüzüz eder, bu da filtrasyonda zorluğa sebep olur [15]. Bunlarla birlikte, geleneksel asit çözümlerinin yüksek tüketim, geri dönüşüm sorunu veya çevreye zarar verme gibi dezavantajları nedeniyle, araştırmacılar sürekli olarak çevreye zarar vermeyen, yüksek verimle metal geri kazanımına uygun, düşük sıcaklıkta liç işlemi için uygun ve aynı zamanda düşük maliyetli yeni yöntemler aramaktadır [5]. Son zamanlarda çevreci olarak kabul edilen iyonik sıvılar ve düşük ötektik noktali çözücüler her ne kadar yüksek çinko ekstraksiyon verimi sağlamış olsalar da yüksek maliyetleri ve proses sürecindeki zorluklar nedeniyle kullanımları sınırlıdır [16,17].

Çinko atıklarından yüksek oranda çinko geri kazanımı için sülfatlayıcı kavurma metodu üzerine çalışmalar devam etmektedir. Bu yöntemde, atık içerisinde farklı mineralojik yapılarda olan çinko metali, oksijen atmosferinde suda çözünür çinko sülfata dönüştürülür ve daha sonra reaksiyona girmemiş diğer metallere su liçi ile ayrılabilir [18,19]. Ayrıca, bu süreçte koloidal silika üretiminden kaçınılır, böylece liç işleminden sonra liç çözeltisinin filtrasyonu önemli ölçüde daha uygun hale gelir [16]. Sülfatlayıcı kavurma metodu için genellikle sülfürik asit, düşük reaksiyon sıcaklığı, yüksek reaksiyon aktivitesi ve verimliliği nedeniyle umut verici bir süreç olarak kabul edilir. Ancak, sülfürik asidin özellikle kavurma ortamında yarattığı korozyon ve atık gaz gibi sorunları bulunmaktadır [20]. Bu sorunları ortadan kaldırmak için sülfürik asit yerine kullanılabilir yeni kükürt içerikli reaktif arayışı devam etmektedir.

Bu çalışmada, çinko üretiminde asit liçi aşamasının sonunda ortaya çıkan çinko tesis atıklarından çinko geri kazanımı incelenmiştir. Sülfatlayıcı kavurma ve su liçi proseslerini içeren iki aşamalı çinko ekstraksiyonu için optimum çalışma koşulları belirlenmiştir. İlk aşamada, çinko ferrit ve çinko silikat gibi suda çözünmeyen çinko bileşiklerini çözünür türlerine dönüştürmek için amonyum sülfat ile kavurma işlemi yapılmıştır. Kavurma aşamasında, amonyum sülfat varlığında reaksiyon süresinin ve sıcaklığın etkisi incelenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında, birinci aşamanın sonunda elde edilen kavurulmuş atık malzemeler, su ile liç edilmiştir ve çinko, kalsiyum ve demir çözünürlükleri hesaplanmıştır. Ayrıca çalışmada, temin edilen çinko

atığının fiziksel, kimyasal ve mineralojik karakterizasyonu da gerçekleştirilmiştir.

2 Materyal ve metod

2.1 Malzemeler

Metal geri kazanım işlemlerinde kullanılan çinko liç atığı 1976'dan bu yana Kayseri'de faaliyet gösteren ÇİN-KUR atık sahasından temin edilmiştir (Özelleştirme sonrasında Çinkom olarak faaliyetlerini sürdürmektedir.). Deneyler öncesi numunenin tane boyutunun küçülmesi ve homojen bir hale gelmesi için bilyeli bir değirmende öğütme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sülfatlama ajanı olarak kullanılan amonyum sülfat [(NH₄)₂SO₄, >%98] Tekkim firmasından granül halinde temin edilmiştir. Deneysel çalışmalardan önce amonyum sülfat öğütülerek toz haline getirilmiştir. Liç işlemlerinde kullanılan saf su MP MINIPure marka saf su cihazından elde edilmiştir. Sigma firmasından temin edilen nitrik asit (HNO₃, %65), metal içeriğinin tespiti öncesinde liç çözümlerini asitlendirmek için kullanılmıştır. Atomik absorpsiyon spektrofotometresi için elementlerin (1000 mg/L) standart çözümleri Merck'ten temin edilmiştir.

2.2 Numune karakterizasyonu

Çinko liç atığının kimyasal bileşimini belirlemek için X-ışını floresans spektrometresi (XRF, Rigaku – Nex-CG) kullanılmıştır. Liç atığının sahip olduğu mineralojik yapıları ve farklı şartlar altında kavurulmuş çinko atıklarında meydana gelen yapısal değişiklikleri tespit etmek için X-ışınları difraktometresi (XRD, Bruker Advance D8) kullanılmıştır. Çinko liç atığının morfolojik özelliği enerji dağılımlı spektrometri (EDS) modülüne sahip taramalı elektron mikroskobu (SEM, Hitachi SU 5000) ile incelenmiştir. Ayrıca, SEM ve EDS verileriyle elde edilen renkli haritalama yöntemi temsili numunedeki olası fazları belirlemek için kullanılmıştır. Liç işlemlerinden sonra elde edilen metal yüklü liç solüsyonlarının iyon konsantrasyonları atomik absorpsiyon spektrofotometresi (AAS, Perkin Elmer T900) ile analiz edilmiştir.

2.3 Sülfatlayıcı kavurma

Sülfatlayıcı kavurma işleminden önce 10 g çinko atığı ile 20 g öğütülmüş amonyum sülfat bir havanda karıştırılarak homojen bir karışım elde edilmiştir. Elde edilen karışım daha sonra seramik bir kaba aktarılmıştır. Sülfatlama reaksiyonu Protherm PLF 130/25 model kül fırınında gerçekleştirilmiştir. Sülfatlama reaksiyonu oda sıcaklığından başlayarak 25 °C/dk ısıtma hızı ile ısıtılarak önceden belirlenen reaksiyon sıcaklığında yapılmıştır. Deney sonunda numune fırında soğutulmuştur. Reaksiyon süresinin çinko liç atığının yapı değişikliği üzerine etkisi 600 °C'de 1, 2 ve 4 saatlik deneylerle incelenmiştir. Ayrıca, reaksiyon sıcaklığının etkisi 4 saatlik deneylerle birlikte 25 °C'lik artışla 600 – 700 °C aralığında araştırılmıştır. Sülfatlama reaksiyonu için belirlenen reaksiyon sıcaklıkları atık içerisinde yer alan çinko içerikli yapıların literatürde bahsedilen bozunma sıcaklıkları göz önüne alınarak seçilmiştir [21-23]. Ayrıca, liç işlemleri ile birlikte demir çözünürlüğünü en aza indirmek için demir (III) sülfat (Fe₂SO₄) yapısının hematit (Fe₂O₃) yapısına dönüşme

sıcaklığı dikkate alınmıştır [24]. Sülfatlama deneylerinden sonra elde edilen numunelerin kimyasal ve faz analizi sırasıyla XRF ve XRD ile gerçekleştirilmiştir.

2.4 Su liçi

Kavurma işlemlerinden sonra elde edilen sülfatlanmış numunelerden çinko geri kazanımı su liçi ile gerçekleştirilmiştir. Tüm liç deneyleri, manyetik karıştırıcı ısıtma mantosuna yerleştirilmiş 100 mL'lik üç boyunlu bir balon içerisinde gerçekleştirilmiştir. Liç ortamının sıcaklığı $\pm 0,5$ °C hassasiyete sahip bir termokupl ile kontrol edilmiştir. Liç deneyleri 50 mL su içerisinde 1/25 g/mL katı/sıvı oranında yapılmış ve bulamaç 600 devir/dk'da karıştırılmıştır. Çinko atığından çinko geri kazanımı için optimum çalışma sıcaklığını ve süresini belirlemek için tek faktörlü deneyler 1.2 ve 4 saat ve 25, 50 ve 75 °C sıcaklık aralığında yapılmıştır. Liç ortamı daha önceden ayarlanmış sıcaklığa geldiğinde 2 g numune eklenmiş ve deney süresince karıştırılmıştır.

Liç testlerinden sonra katı ve sıvı kısımları ayırmak için vakum pompası kullanılarak 0.45 μm 'lik filtre kâğıdı ile süzme işlemi gerçekleştirilmiştir. Filtre üzerinde kalan katı kısım yıkanarak metal yüklü liç çözeltileri elde edilmiştir. Elde edilen liç çözeltileri hacimce %5'lik HNO_3 çözeltisi ile asitlendirilerek AAS ile analiz edilmiştir. AAS analizinden önce, kalibrasyon eğrisi 5 ayrı konsantrde standart solüsyon kullanarak çizilmiştir ve sadece 0.999'dan büyük korelasyon katsayısı elde edildikten sonra analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, liç işlemlerinden sonra ortaya çıkan liç kalıntısının kimyasal kompozisyonu XRF analizi ile incelenmiştir. Çinko, demir, kurşun ve kalsiyum metallerinin geri kazanım oranları sıvı ve katı temelli olarak **Denklemler (1) ve (2)** yardımıyla hesaplanmıştır [25].

$$\% \text{ Metal Geri Kazanımı} = (C \times V \times s) / (m \times w) \quad (1)$$

burada, C: AAS analizden elde edilen 3 farklı metal (Zn, Ca ve Fe) konsantrasyonlarının ortalaması (mg/L), V: liç sonrası elde edilen metal yüklü çözeltinin hacmi (L), s: AAS ile analizden önce yapılan seyreltme miktarı, m: liç deneylerinde kullanılan kavrulmuş çinko atığının ağırlığı (g), w: Çinko atığının farklı sıcaklıklarda kavruktan sonra ihtiva ettiği metallerin ağırlıkça oranıdır (mg/g).

$$\% \text{ Metal Geri Kazanımı} = 1 - \left(\frac{m_1 \times w_1}{m_2 \times w_2} \right) \quad (2)$$

burada, m_1 : çinko atığının liç öncesi ağırlığı (g), w_1 : Liç öncesi kavrulmuş atığının içerdiği metallerin (Zn, Fe, Ca) ağırlıkça oranları (%), m_2 : liç sonrası liç atığının ağırlığı (g) ve w_2 : liç sonrası atığının içerdiği metallerin ağırlıkça oranları (%). Deneysel işlem basamakları **Şekil 1**'de gösterilmiştir.

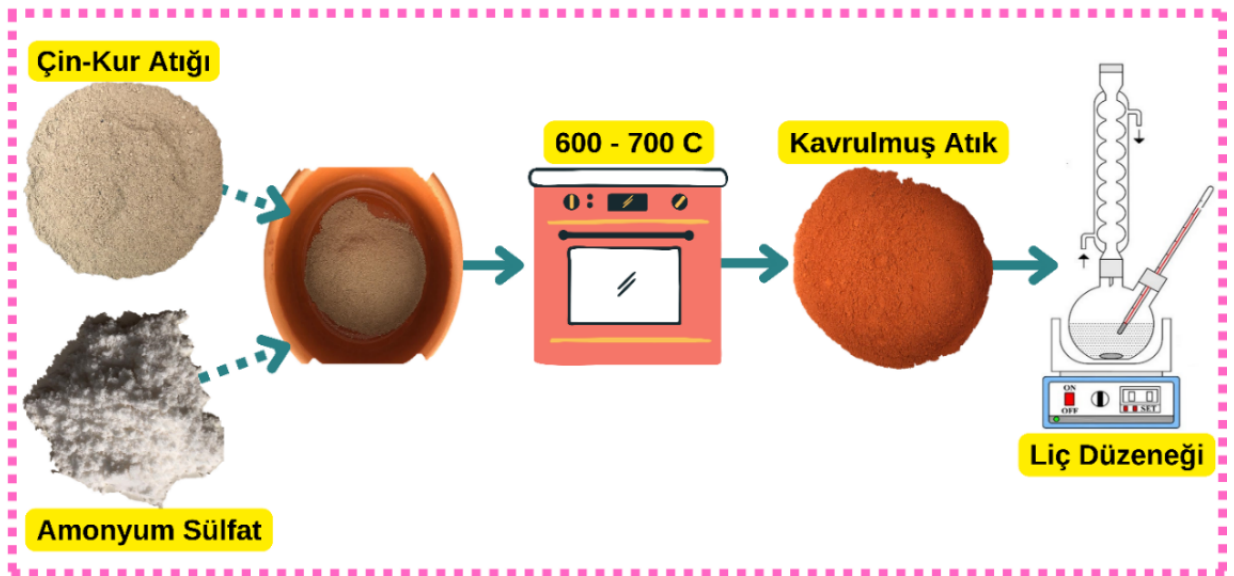
3 Bulgular ve tartışma

3.1 Çinko atığının kimyasal ve mineralojik özellikleri

XRF analizi ile elde edilen çinko liç atığının kimyasal analizi **Tablo 1**'de verilmiştir. Atığın kimyasal analize göre, liç deneylerinde kullanılan numune ağırlıkça %16.6 kurşun, %12.5 çinko ve %10.1 kükürt içermektedir. Bu elementlerle birlikte kayda değer miktarda demir (%7.5), silisyum (%6.5), kalsiyum (%4.8) ve magnezyum (%1.2) metallerini de içermektedir. Önceki çalışmalarda kullanılan çinko liç atıklarının kimyasal bileşimleri incelendiğinde, bu tür atıkların ana elementlerinin ağırlıkça oranları %10 – 13 Zn, %13 – 16 Pb ve %5 – 7 Fe olduğu tespit edilmiştir [6,11,26].

Tablo 1. Çinko liç atığının kimyasal kompozisyonu

Element	Pb	Zn	S	Fe	Si	Ca	Mg	O
Ağırlıkça %	16.6	12.5	10.1	7.5	6.5	4.8	1.2	35.0

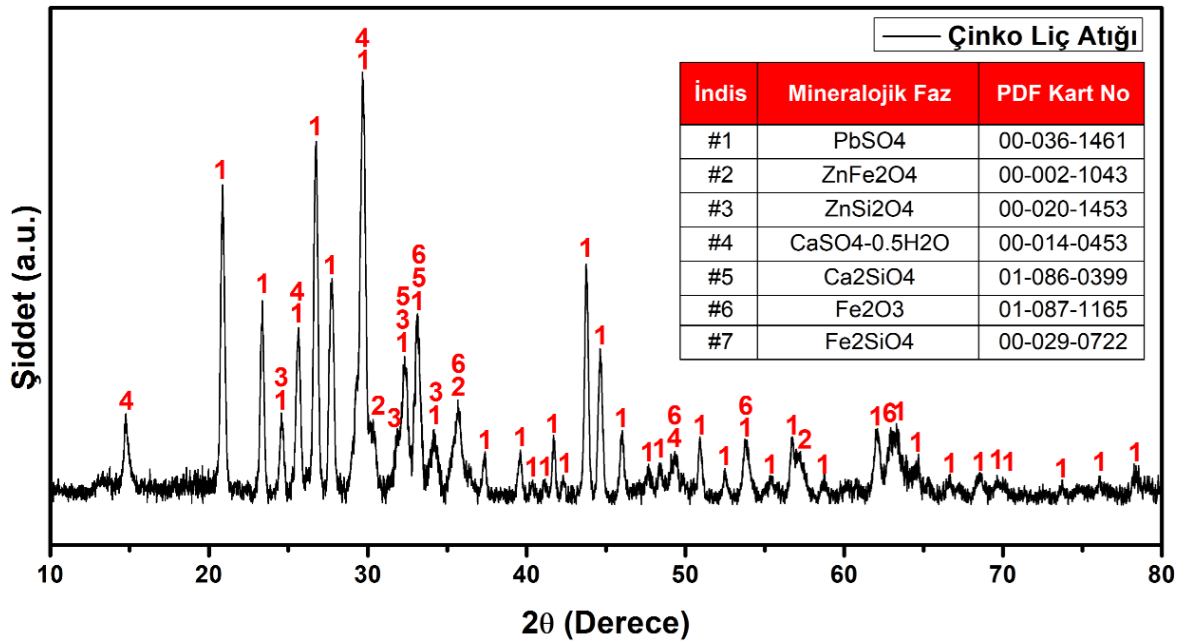


Şekil 1. Deneysel işlem basamaklarının şematik gösterimi

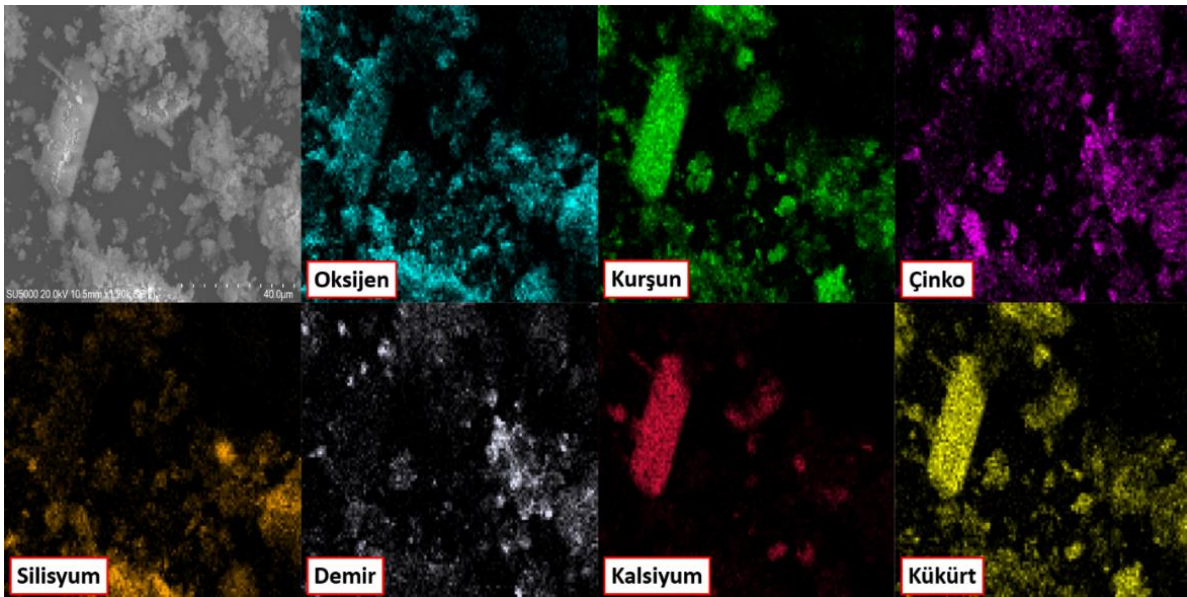
XRF analizi ile elde edilen sonuçlar literatür ile karşılaştırıldığında, çinko liç atığının kimyasal kompozisyonunun literatürle uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Şekil 2’den de anlaşılacağı üzere çinko liç atığının ana yapısını $PbSO_4$ bileşiği oluşturmaktadır. Numune çinko içerikli yapı olarak $ZnSiO_4$ ve $ZnFe_2O_4$ fazlarını ihtiva etmektedir. Atık bünyesinde bulunan demir Fe_2O_3 formunda bulunduğu belirlenmiştir. Ayrıca, atık içerisinde $CaSiO_4$ ve $CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$ yapılarının varlığı da tespit edilmiştir.

Çinko atığının SEM görüntüsü ve renkli elementel dağılım haritası Şekil 3’te gösterilmiştir. Renkli elementel haritalama yönteminde çinko atığının ana elementleri oksijen, kurşun, çinko, silisyum, demir, kalsiyum ve kükürt sırasıyla mavi, yeşil, pembe, turuncu, beyaz, kırmızı ve sarı

renklerle temsil edilmiştir. Şekil 3’te verilen numunenin temsili SEM görüntüsüne göre, çinko atığı hem şekil hem de boyut olarak homojen yapılara sahip olmadığı tespit edilmiştir. SEM görüntüsünde yuvarlak, küresel, düz, levha ve çubuksu olmak üzere çeşitli şekiller gözlemlenmiştir. Renkli elementel haritalama yöntemine göre çinko atığının bünyesinde yer alan oksijen, kurşun, çinko ve kükürt elementlerinin homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Bazı bileşenlerde kurşun ve kalsiyum elementlerinin paralel olarak $PbSO_4$ ve $CaSO_4$ yapılarını oluşturduğu tespit edilmiştir. Demirin çinko ile birlikte yoğunlaştığı ve franklinit ($ZnFe_2O_4$) yapısını oluşturduğu belirlenmiştir. SEM-EDS sonuçlarının numunenin XRF ve XRD analizleri ile benzerlik gösterdiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 2. Çinko liç atığının XRD analizi



Şekil 3. Çin – Kur liç atığının SEM görüntüsü ve renkli elementel haritalama grafiği

3.2 Sülfatlayıcı kavurmanın atık mineralojisine etkisi

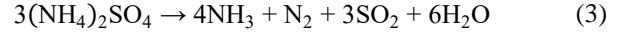
Çinko atığı bünyesinde yer alan çinko metalini geri kazanmak için sülfatlama reaksiyonu ön işlem olarak gerçekleştirilmiştir. Kavurma işlemleri 600 °C’de 1.2 ve 4 saatlik reaksiyonlar ile birlikte 4 saatlik deneylerle 600 – 700 °C sıcaklık aralığında yapılmıştır. Kavurma işlemlerinden sonra elde edilen numunelerin kimyasal kompozisyonları **Tablo 2**’de gösterilmektedir.

Kavurma deneylerinden sonra elde edilen numunelerin kimyasal kompozisyonları incelendiğinde, 600 °C’de farklı sürelerde yapılan tüm kavurma deneylerinden sonra atığın sahip olduğu kurşun, çinko, demir ve kalsiyum içerikleri ilk duruma göre azaldığı tespit edilmiştir. Farklı sürelerde kavrulmuş numunelerin kurşun içerikleri ağırlıkça %14.0 – 14.6 aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Çinko ve demir miktarları ise sırasıyla %10.6 – 11.0 ve %6.3 – 6.6 aralığında olduğu belirlenmiştir. Kavurma deneylerinde kullanılan amonyum sülfat varlığı nedeniyle, kükürt içeriği başlangıç numunesine göre arttığı saptanmıştır. Bununla birlikte, farklı sıcaklıklarda yapılan kavurma deneylerinden sonra atığın sahip olduğu kurşun miktarı artan sıcaklık ile birlikte artarak 700 °C’lik deney sonrası %16.1 olarak belirlenmiştir. Kavrulmuş numunelerin çinko içeriği 600, 625, 650, 675 ve 700 °C’lik deneyler sonrası sırasıyla %11.0, 11.5, 11.9 ve 12.4 ve 12.1 olarak tespit edilmiştir. 675 ve 700 °C’de yapılan kavurma deneylerinden sonra elde edilen numunelerin kimyasal kompozisyonları kavrulmamış numune ile yaklaşık olarak benzerlik gösterdiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda yapılan kavurma deneylerinden sonra kükürt miktarındaki azalma sülfatlı bileşiklerin bozunması ile açıklanabilir. Kavurma deneylerinden sonra ortaya çıkan numunelerin kimyasal kompozisyonlarındaki farklılık, deney sırasında meydana gelen ağırlık değişimleri ve amonyum sülfatın sahip olduğu kükürdün tepkimeye girme oranı ile açıklanabilir.

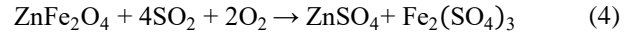
Kavurma işlemlerinden sonra elde edilen numunelerin XRD analizleri **Şekil 4** ve **Şekil 5**’te gösterilmiştir. Ayrıca, numunelerin içerdiği yapılara ait JCPDS veri tabanı bilgileri **Tablo 3**’de verilmiştir.

Şekil 4’te verilen XRD grafiklerine göre, 600 °C’de farklı sürelerde yapılan kavurma deneylerinden sonra çinko liç atığın mineralojik yapısında kayda değer değişikliklerin olduğu tespit edilmiştir. Ancak, atığın ana yapısını oluşturan PbSO₄’de artan reaksiyon süresi ile birlikte yapısal olarak bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Tüm reaksiyon sürelerinin sonunda, atığın sahip olduğu çinko içerikli yapıların (ZnFe₂O₄ ve Zn₂SiO₄) bozunarak ZnSO₄ yapısına dönüştüğü

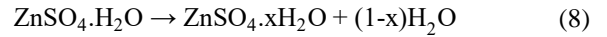
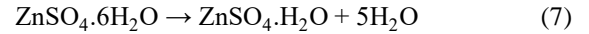
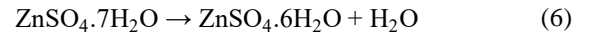
tespit edilmiştir. Bununla birlikte kavurma işlemlerinden atık içerisinde Zn_{0,95}Fe_{0,05}O yapısının da varlığı belirlenmiştir. Li ve ark., [21], saf amonyum sülfatın 300 – 520 °C arasında **Denklem (3)**’e göre bozunarak NH₃, N₂, SO₂ ve H₂O gazlarını ortaya çıkarttığını belirtmişlerdir.



Kavurma işlemi sırasında, çinko içerikli yapılar ile saf amonyum sülfatın ortaya çıkarttığı SO₂ gazı arasında olası kimyasal reaksiyonlar aşağıdaki gibidir (**Denklem 4 – 5**) [22–24].



Ayrıca, çinko atıklarında bulunan ZnSO₄.7H₂O yapısı artan sıcaklıkla birlikte farklı kademelerde bozunarak ZnSO₄ yapısını oluşturmaktadır (**Denklem 6 – 8**) [27,28].



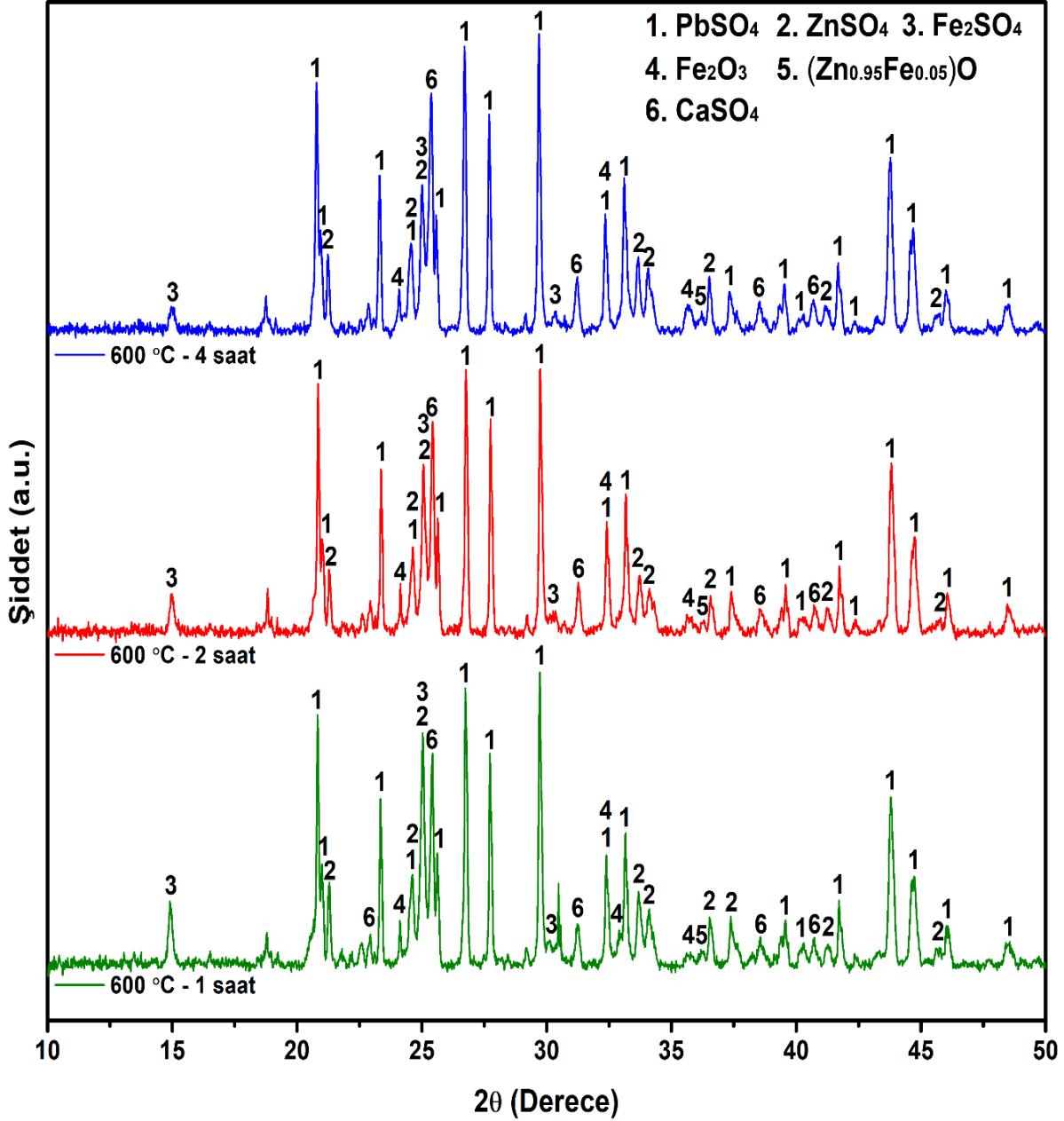
Kurşun ve çinko dışında atık içerisinde kayda değer miktarda bulunan demir ve kalsiyumun dönüşümü su liçi için oldukça önemlidir. Bu nedenle, sülfatlayıcı kavurma sırasında demir ve kalsiyum içerikli yapıların davranışı da incelenmiştir. **Şekil 4**’ten de anlaşılacağı üzere, atığın sahip olduğu Fe₂O₃ yapısı bozunarak Fe₂SO₄ yapısına dönüşmüştür. Bununla birlikte, tüm reaksiyon sürelerinin sonunda Fe₂O₃ yapısının da varlığı saptanmıştır.

Tablo 3. Kavrulmuş numunelerin ihtiva ettiği fazlar ve PDF kart numaraları

Mineralojik Fazlar	PDF Kart Numarası
PbSO ₄	00 – 036 – 1461
ZnSO ₄	01 – 080 – 2210
CaSO ₄	00 – 037 – 1496
Fe ₂ SO ₄	00 – 047 – 1774
Fe ₂ O ₃	01 – 087 – 1165
(Zn _{0,95} Fe _{0,05})O	01 – 080 – 0787
ZnO.ZnSO ₄	00 – 032 – 1476

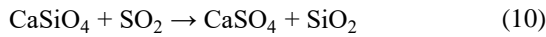
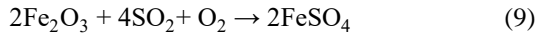
Tablo 2. Farklı sıcaklık ve sürelerde kavrulmuş çinko liç atıklarının kimyasal kompozisyonları

Kavurma Sıcaklığı (°C)	Kavurma Süresi (saat)	Element (%)							
		Pb	Zn	S	Fe	Si	Ca	Mg	
600	1	14.0	10.6	15.5	6.3	5.5	4.1	1.0	
600	2	14.1	10.7	15.5	6.4	5.5	4.1	1.0	
600	4	14.6	11.0	15.1	6.6	5.7	4.5	1.1	
625	4	15.2	11.5	14.8	6.9	5.9	4.4	1.1	
650	4	15.8	11.9	13.2	7.2	6.2	4.6	1.2	
675	4	16.4	12.4	10.2	7.4	6.4	4.8	1.2	
700	4	16.1	12.1	8.8	7.5	6.8	5.0	1.2	



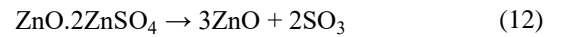
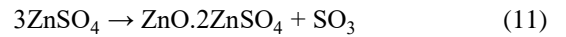
Şekil 4. 600 °C’de farklı sürelerde kavrulmuş çinko liç atıklarının XRD analizleri

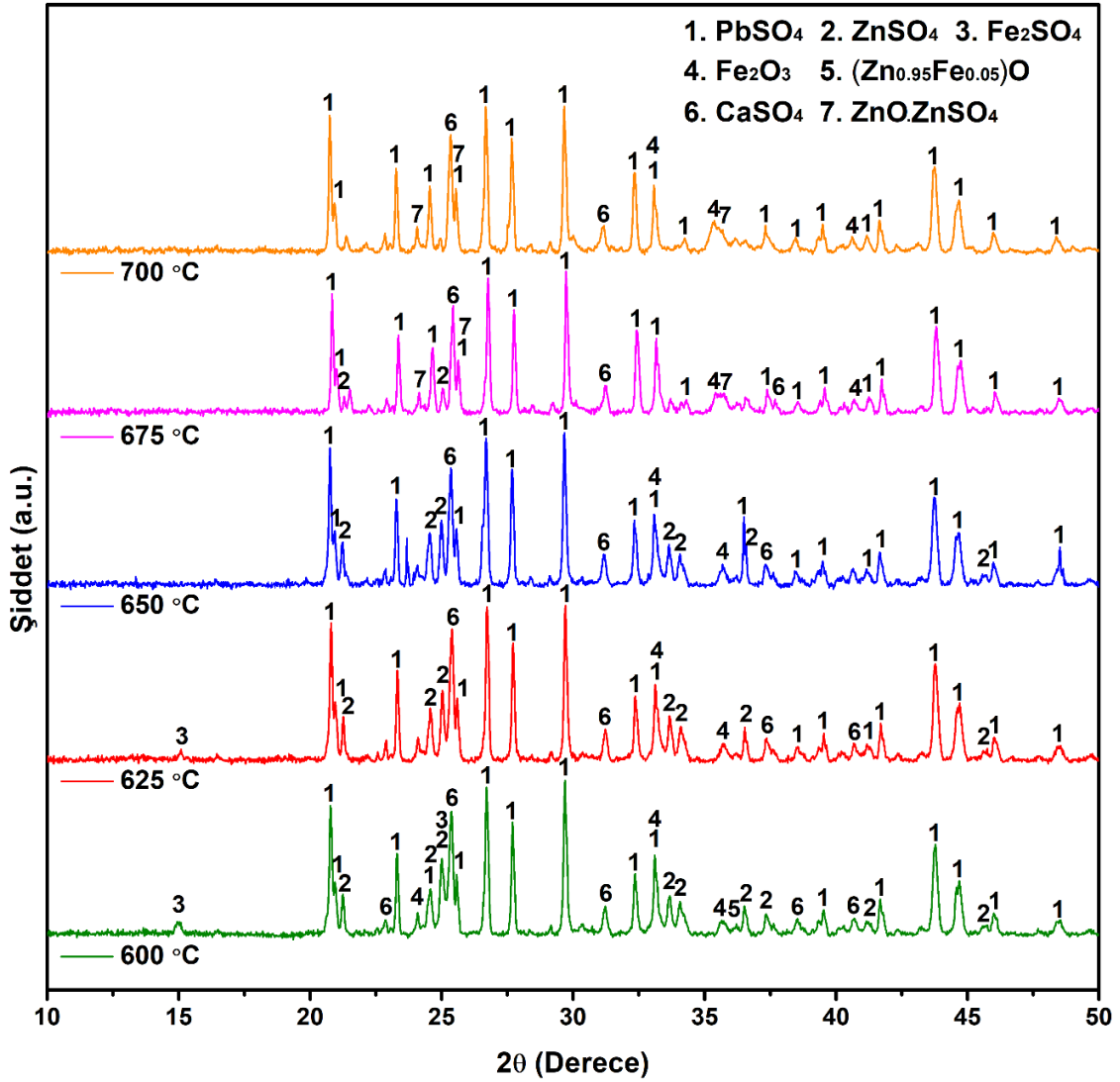
Atığın ihtiva ettiği CaSiO_4 fazı ise bozularak CaSO_4 yapısına dönüştüğü tespit edilmiştir. Fe_2O_3 ve CaSiO_4 fazlarının dönüşüm reaksiyonları sırasıyla Denklem (9) ve Denklem (10)’da verilmiştir.



600 °C’de yapılan sülfatlama deneylerinin sonunda demir içerikli yapıların suda çözünebilir FeSO_4 yapısına dönüşmesi su liçi için olumsuzluk teşkil edeceğinden ötürü kavurma işlemleri daha yüksek sıcaklıkta yapılmıştır. 600 – 700 °C sıcaklıkları arasında yapılan 4 saatlik kavurma işlemlerinden sonra elde edilen numunelerin XRD analizleri Şekil 5’te verilmiştir.

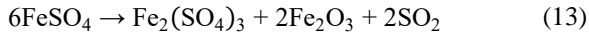
Farklı sıcaklıklarda yapılan sülfatlama reaksiyonlarından anlaşılacağı üzere, artan kavurma sıcaklığının Çinko atığında bulunan PbSO_4 yapısı üzerine etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. 600 – 650 °C arasındaki sıcaklıklarda çinko içerikli yapılarının bozularak ZnSO_4 yapısına dönüştüğü tespit edilmiştir. Ancak 650 °C’den daha yüksek sıcaklıklarda (675 ve 700 °C), ZnSO_4 yapısının tekrar bozularak $\text{ZnO} \cdot \text{ZnSO}_4$ yapısına dönüştüğü belirlenmiştir. ZnSO_4 fazının yüksek sıcaklıklarda bozunma reaksiyonu Denklem (11) ve Denklem (12)’de verilmiştir [28,29].





Şekil 5. Farklı sıcaklıklarda kavrulmuş çinko liç atıklarının XRD analizleri

Ayrıca, artan kavurma sıcaklığı ile birlikte, atığın sahip olduğu demir içerikli yapılar önce Fe_2SO_4 yapısına daha sonra Fe_2O_3 yapısına dönüştüğü gözlemlenmiştir. Manset ve ark. [24], 525 – 710 °C sıcaklıkları arasında Fe_2SO_4 yapısının dönüşme reaksiyonlarının Denklem (13) ve Denklem (14)'e göre olduğunu göstermişlerdir.

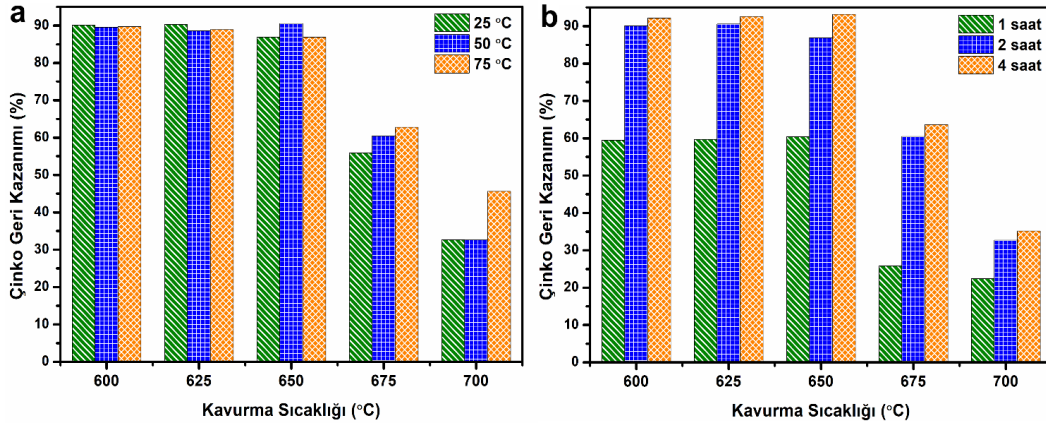


3.3 Çinko geri kazanımı

Farklı sıcaklıklarda amonyum sülfatla ile kavrulmuş çinko atıklarından çinko geri kazanımı için su liç yapılmıştır. Liç testleri, 1/25 g/mL katı/sıvı oranı kullanılarak 2 saatlik deneylerle 25 – 75 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir. Kavrulmuş çinko atıklarından çinko geri kazanım sonuçları Şekil 6(a-b)'de verilmiştir.

Şekil 6a'da görüleceği üzere, 600 °C'de kavrulmuş numuneden çinko geri kazanımı 25, 50 ve 75 °C liç sıcaklıklarında yaklaşık olarak sırasıyla %90.1, %89.6 ve

%89.7 olarak elde edilmiştir. Artan kavurma sıcaklığı ile birlikte tüm liç sıcaklıklarında çinko geri kazanımı bir miktar artarak 650 °C'de kavrulmuş numuneden 50 °C'lik liç deneyinden sonra %91.9 olarak elde edilmiştir. Ancak, daha yüksek kavurma sıcaklıklarında (675 ve 700 °C) elde edilen numunelerden çinko geri kazanımında keskin bir azalmanın olduğu tespit edilmiştir. 25 °C'de yapılan liç deneyinden sonra 675 °C'de amonyum sülfat ile kavrulmuş numuneden %55.9 oranında çinko geri kazanımı elde edilmiştir. Aynı numuneden artan liç sıcaklığı ile birlikte çinko geri kazanımı bir miktar artmış olsa da daha düşük kavurma sıcaklıklarına göre daha az çinko geri kazanımı sağlanmıştır. 700 °C'de amonyum sülfat ile kavrulmuş çinko atığından daha düşük kavurma sıcaklıklarına göre çinko geri kazanımında yaklaşık olarak %35.3 - %48.2 oranında bir azalmanın olduğu tespit edilmiştir. 700 °C'de kavrulmuş numuneden farklı liç sıcaklıklarında yaklaşık olarak %32.6, %32.7 ve %45.6 olarak elde edilmiştir. Çeşitli liç sıcaklıklarında elde edilen çinko geri kazanım sonuçlarının ışığı altında, optimum liç sıcaklığı 25 °C olarak tercih edilebilir.



Şekil 6. Çinko geri kazanımında (a) liç sıcaklığının ve (b) liç süresinin etkisi

Artan liç sıcaklığı ile birlikte çinko geri kazanımında bir miktar artış olsa da enerji tasarrufu ve endüstriyel kaygılar göz önüne alındığında oda sıcaklığında liç yapılması en uygun seçenek olacaktır. Düşük kavurma sıcaklıklarında elde edilen yüksek çinko geri kazanımı, atığın sahip olduğu Zn_2SiO_4 ve $ZnFe_2O_4$ yapılarının Denklem (3) ve Denklem (4)'e göre suda çözünebilir $ZnSO_4$ yapısına dönüşmesi ile açıklanabilir. Daha yüksek kavurma sıcaklıklarında elde edilen numunelerden çinko geri kazanımındaki düşüş ise çinko sülfat yapısının Denklem (10) ve Denklem (11)'de verilen reaksiyonlara göre bozunması ile ifade edilebilir.

Liç süresinin amonyum sülfat ile kavurulmuş çinko atıklarından çinko geri kazanımı üzerine etkisini belirlemek için 25 °C'de farklı liç sürelerinde su liçleri yapılmıştır. Liç testleri, 1/25 g/mL katı/sıvı oranı kullanarak 1, 2 ve 4 saatlik deneylerle gerçekleştirilmiştir. Kavurulmuş çinko atığından farklı liç sürelerinin sonunda elde edilen çinko geri kazanım sonuçları Şekil 6b'de gösterilmiştir.

Şekil 6b'den anlaşılacağı üzere, 1 saatlik liç deneylerinin sonunda elde edilen çinko geri kazanım değerleri uzun sürelerde yapılan liç deneylerine göre daha az olduğu tespit edilmiştir. 600 °C'de kavurulmuş numuneden 1 saatlik liç deneyinden sonra elde edilen çinko geri kazanım değeri %59.5 iken, artan liç süresi ile birlikte 2 ve 4 saatlik deneylerden sonra sırasıyla %90.1 ve %92.2 olarak elde edilmiştir. 600, 625 ve 650 °C'de yapılan kavurma işlemlerinden sonra elde edilen çinko geri kazanımı tüm liç sürelerinde yaklaşık olarak aynı olduğu saptanmıştır. En yüksek çinko geri kazanımı, 650 °C'de yapılan kavurma işlemlerinden sonra ortaya çıkan numuneden 25 °C'de 4

saatlik liç deneyinden sonra %93.2 olarak elde edilmiştir. Ancak, 600 ve 625 °C'de kavurulmuş numunelere kıyaslandığında çinko geri kazanımındaki artışın sadece %1 oranında olduğu tespit edilmiştir. Deneysel çalışmaların sonuçları, kavurma sıcaklığının artması ile birlikte farklı liç sürelerinde elde edilen çinko geri kazanımı düşük kavurma sıcaklıklarına nazaran daha düşük kaldığını göstermiştir. 675 °C'de amonyum sülfat ile kavurulmuş numuneden 1, 2 ve 4 saatlik liç deneylerinden sonra sırasıyla %25.8, %60.5 ve %63.7 çinko geri kazanımı elde edilmiştir. Artan kavurma sıcaklığı ile birlikte (700 °C) çinko geri kazanım değerleri daha da azalarak aynı liç sürelerinde %22.4, %32.7 ve %35.1 olarak bulunmuştur.

Yukarıda bahsedilen deneysel verilerin ışığı altında, önerilen yöntem ile çinko atığından çinko geri kazanımı için enerji tasarrufu ve endüstriyel kaygılar dikkate alındığında optimum şartları, 1:2 (g:g) oranında atık/amonyum sülfat oranı, 625 °C kavurma sıcaklığı, 4 saat kavurma süresi, 25 °C liç sıcaklığı ve 2 saat liç süresi olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarda incelenen parametrelerin optimum seviyeleri ve bu şartlar altında elde edilen metal geri kazanım oranları Tablo 4'de gösterilmiştir.

Çinko atığından çinko geri kazanımı için belirlenen optimum şartlarda yapılan liç deneyinden sonra ortaya çıkan liç kalıntısının kimyasal ve mineralojik analizi XRF ve XRD cihazları ile gerçekleştirilmiştir ve diğer elementlerin çözünme davranışları ile olası çözünme mekanizması ortaya çıkarılmıştır. Tablo 5'de liç kalıntısının kimyasal analizi gösterilmiştir.

Tablo 4. Optimum şartlar altında elde edilen çinko, kalsiyum ve demir geri kazanım oranları

Deney Parametresi	Seviye	Deney No #1			Deney No #2			Deney No #3		
		Zn	Ca	Fe	Zn	Ca	Fe	Zn	Ca	Fe
Kavurma Sıcaklığı	625 °C									
Kavurma Süresi	4 saat	%90.2	%39.2	%15.5	%91.3	%41.2	%16.1	%88.9	%39.7	%16.8
Liç Sıcaklığı	25 °C									
Liç Süresi	2 saat									

Tablo 5. Çinko liç atığının ve liç kalıntısının karşılaştırmalı kimyasal kompozisyonu

Element	Pb	Zn	Fe	Ca	Si	S
Çinko Liç Atığı	16.6	12.5	7.5	4.8	6.5	10.1
Liç Kalıntısı	32.8	1.8	10.4	4.7	15.2	5.6

Liç kalıntısının kimyasal analizine göre, çinko oranının keskin bir şekilde ağırlıkça %12.5'ten %1.8'e düştüğü gözlemlenmiştir. Metalurjik denge göz önüne alındığında, su liçinden sonra atığın miktarındaki azalma ile birlikte (2 g'dan 1.2 g'a) çinko geri kazanımının %91.3 seviyesinde olduğu Denklem (2) yardımıyla hesaplanmıştır (Denklem 15). Bu sonuç metal yüklü liç çözeltisinin analizi ile uyumluluk göstermektedir. Çinkonun aksine, çinko atığının içerdiği kurşun, demir, kalsiyum ve silisyum elementlerinin ağırlıkça oranları arttığını belirlenmiştir. Bu durum elementlerin çok az çözündüğünü veya hiç çözünmediğini anlamına gelmektedir. Yapılan hesaplamalara göre kurşun ve silisyumun çözünmediği, demir ve kalsiyumun çözünme oranlarının sırasıyla %16.8 ve %41.2 olduğu tespit edilmiştir (Denklem 16 ve 17).

$$\text{Çinko Geri Kazanımı} = \left[\frac{(2 \times 12.5) - (1.2 \times 1.8)}{(2 \times 12.5)} \right] \times 100 = \%91.3 \quad (15)$$

$$\text{Kalsiyum Çözünürlüğü} = \left[\frac{(2 \times 4.8) - (2 \times 4.7)}{(2 \times 4.8)} \right] \times 100 = \%41.2 \quad (16)$$

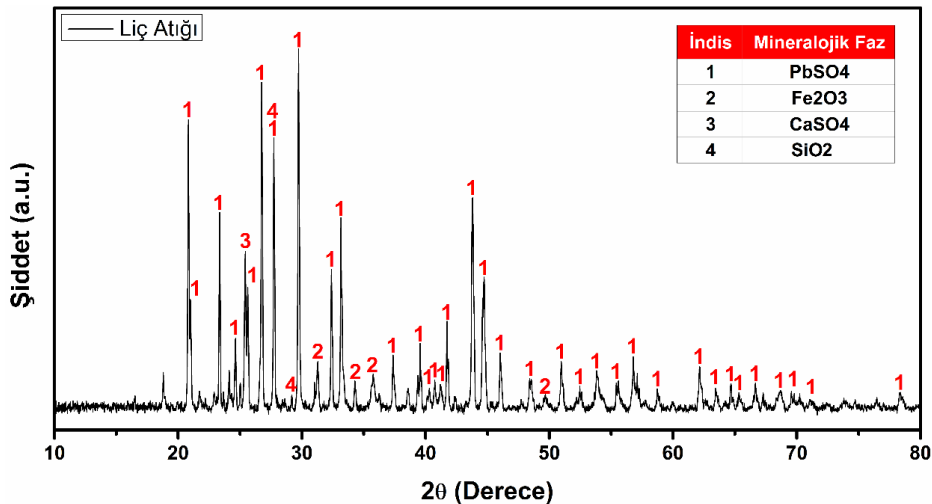
$$\text{Demir Çözünürlüğü} = \left[\frac{(2 \times 7.5) - (2 \times 10.4)}{(2 \times 7.5)} \right] \times 100 = \%16.8 \quad (17)$$

Tablo 3'de verilen çalışma şartları altında yapılan su liçi deneylerinden sonra ortaya çıkan liç kalıntısının XRD analizi Şekil 7'de gösterilmektedir. Elde edilen XRD desenine göre, sülfatlama işleminden sonra numune içerisinde yer alan ZnSO₄ yapısına ait piklerin kaybolduğu görülmektedir. Bu sonuç liç çözeltisinin AAS analizi ile ikincil katının XRF analizinin tutarlı olduğunu ve ZnSO₄'ün yüksek çözünürlüğünü göstermektedir. Ayrıca, PbSO₄ bileşenine ait piklerin artan yoğunluğu su liçi sonrasında PbSO₄ fazının ikincil katıda kaldığını kanıtlamaktadır. Yukarıda da bahsedildiği üzere, çinko atığı bünyesinde yer alan demirin hidrometalurjik yöntemle çinko geri kazanım işlemlerinde çözeltiye geçmemesi gerekmektedir. Çözelti içerisinde demir varlığı, liç çözeltisinden çinko eldesi için yapılan elektroliz yönteminde ortamın voltajını azalmakta ve akım

verimi düşürmektedir. Bu nedenle, çinko elektrolizi için kullanılan çözeltide demir iyonu konsantrasyonu 50 mg/L'den az olmalıdır [14]. Daha yüksek demir konsantrasyonlarında, çözeltiden çinko eldesi öncesinde çözeltinin demirden arındırılması gerekmektedir. Çözelti içindeki demirin çöktürme yöntemi ile uzaklaştırılması, demirin değerliğine göre değişmektedir. Eğer demir +3 değerliğe sahipse, H₃O⁺, K⁺, Na⁺ ve HN₄⁺ iyonları yardımıyla (jarosit yöntemi, [XFe₃(SO₄)₂(OH)₆] çözelti içerisindeki demir düşük konsantrasyonlara indirilebilir [30,31]. Diğer yöntemde (geothit yöntemi) ise çözeltideki demirin geothit [α -FeO(OH)] halinde çöktürülmesi için demirin başlangıç değerliği +2 olmalıdır. Demirin uzaklaştırılması sırasında pH aralığının 2 – 4.5 ve 90 – 95 °C sıcaklığa sahip çinko içerikli çözeltiye üflenen hava veya oksijen Fe²⁺ iyonları Fe³⁺ iyonlarına yükseltgenmekte ve demir geothit formunda çökmektedir [32]. Çinko atıklarından çinko geri kazanımı için genellikle güçlü asitler (HCl, HNO₃ ve H₂SO₄) gibi kullanılmaktadır. Güçlü asitlerle yapılan çalışmalarda yüksek çinko geri kazanımı ile birlikte kayda değer oranda (%60 – 70 demir de çözünmektedir [6,33]. Bu çalışmada elde edilen düşük demir çözünürlüğü, çinkonun eldesi öncesinde demirin uzaklaştırılmasını kolaylaştırılacaktır.

Bu çalışmada elde edilen deneysel veriler ışığı altında, amonyum sülfat ile kavurma ve bu prosesi takip eden su liçi çinko endüstrisi için etkili bir proses olarak kullanılabilir. Yüksek çinko ekstraksiyonu ve düşük demir çözünürlüğü proses ekonomisi için oldukça önemlidir. Bu süreçte amonyum sülfatın bozunması ile ortaya çıkan SO₂ gazlarının atmosfere salınması asit yağmurları gibi çevresel sorunlar meydana getirirse de SO₂ gazının büyük bir miktarı kavurma sırasında çinko atığının bünyesinde yer alan çeşitli yapılarla reaksiyona girerek suda çözünebilir metal sülfat tuzlarını (ZnSO₄, CaSO₄ ve FeSO₄) oluşturmaktadır.

Bu sebeple, atmosfere salınan SO₂ gazı miktarının nispeten daha az olması beklenmektedir. Pirometalurjik kavurma işlemlerinde amonyum sülfat kullanımı sülfürik asidin çalışma ortamında meydana getirdiği korozyon ve çevreye olan zararlarını ortadan kaldırması beklenmektedir.



Şekil 7. Liç kalıntısının XRD analizi

4 Sonuçlar

Bu çalışmada çinko atığından çinkoyu ayırmak için iki aşamadan oluşan yeni bir yöntem önerilmiştir. İlk aşamada, atığın sahip olduğu çinko ferrit ve çinko silikat bileşenlerini çinko sülfat yapısında dönüştürmek amacıyla atık amonyum sülfat ile kavurulmuştur. Daha sonra farklı sıcaklıklarda kavurulmuş numunelerden çinko geri kazanımı için farklı sürelerde ve sıcaklıklarda su liçi gerçekleştirilmiştir. Çinko atığının kimyasal karakterizasyonu, numunenin ağırlıkça sırasıyla %16.6, %12.5 ve %7.5 kurşun, çinko ve demir metallerini içerdiği göstermiştir. Mineralojik çalışmalar, kurşun içeren yapıların tamamen $PbSO_4$ olduğunu, çinko içeren fazların ise $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$, $ZnFe_2O_4$ ve Zn_2SiO_4 olduğunu ortaya çıkarmıştır. Amonyum sülfatla yapılan kavurma işlemleri, numunenin sahip olduğu çinko içerikli yapılar $ZnSO_4$ formuna dönüşmüştür. Ancak, yüksek sıcaklıklarda $ZnSO_4$ yapısının bozunarak $ZnO \cdot ZnSO_4$ yapısına dönüştüğü tespit edilmiştir. Çinko ile birlikte, kalsiyum ve demirin de sülfatlı yapılara dönüştüğü belirlenmiştir. 625 °C'den yüksek sıcaklıklarda demir sülfatlı yapıların bozunarak Fe_2O_3 yapısına dönüştüğü tespit edilmiştir. Su liçi deneyleri sonucunda, en yüksek çinko geri kazanımı için optimum şartlar 625 °C kavurma sıcaklığı, 4 saat kavurma süresi, 25 °C liç sıcaklığı ve 2 saat liç süresi olarak belirlenmiştir. Bu şartlar altında, yaklaşık olarak %91 oranında çinko ekstraksiyonu sağlanırken, kalsiyum ve demir çözünürlükleri sırasıyla %41.2 ve %16.8 olarak elde edilmiştir. Çinko atıklarından, çinko kazanımı için önerilen proses geleneksel kimyasalların çevreye olan zararlarını en aza indirmek için faydalı sonuçlar ortaya çıkarması beklenmektedir.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %13

Kaynaklar

- [1] B. Sun, J. Dai, K. Huang, C. Yang and W. Gui, Smart manufacturing of nonferrous metallurgical processes: Review and perspective, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 29(4), 611-625, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12613-022-2448-x>.
- [2] A. J. Whitworth, J. Vaughan, G. Southam, A. van der Ent, P.N. Nkrumah, X. Ma and A. Parbhakar-Fox, Review on metal extraction technologies suitable for critical metal recovery from mining and processing wastes, *Minerals Engineering*, 182, 107537, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107537>.
- [3] B. K. C. Chan, S. Bouzalakos and A. W. L. Dudeney, Integrated waste and water management in mining and metallurgical industries, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 18(6), 1497-1505, 2008. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60032-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60032-7).
- [4] M. E. Schlesinger, K. C. Sole, W. G. Davenport and G. R. F. A. Flores, *Extractive Metallurgy of copper*, Elsevier, Cambridge, 2021.
- [5] M. S. Alkan, A. Rüßen and M. A. Topçu, Recovery of lead and zinc from complex industrial waste of zinc process with ammonium acetate, *JOM*, 75, 1158-1168, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11837-022-05692-4>.
- [6] A. Rüßen, A. S. Sunkar and Y. A. Topkaya, Zinc and lead Extraction from Çinkur leach residues by using hydrometallurgical method. *Hydrometallurgy*, 93(1), 45-50, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.02.018>.
- [7] J. Fellner, J. Lederer, A. Purgar, A. Winterstetter, H. Rechberger, F. Winter and D. Laner, Evaluation of resource recovery from waste incineration residues – The case of zinc, *Waste Management*, 37, 95-103, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.10.010>.
- [8] K. S. Ng, I. Head, G. C. Premier, K. Scott, E. Yu, J. Lloyd and J. Sadhukhan, A multilevel sustainability analysis of zinc recovery from wastes, *Resources, Conservation and Recycling*, 113, 88-105, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.05.013>.
- [9] M. K. Jha, V. Kumar and R. J. Singh, Recovery of hydrometallurgical recovery of zinc from industrial wastes, *Resources, Conservation and Recycling*, 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).
- [10] L. Tang, C. Tang, J. Xiao, P. Zeng and M. Tang, A Cleaner process for valuable metals recovery from hydrometallurgical zinc residue, *Journal of Cleaner Production*, 201, 764-773, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.096>.
- [11] W. Xin, C. Srinivasakannan, D. Xin-Hui, P. Jin-Hui, Y. Da-Jin and J. Shao-Hua, Leaching kinetics of zinc residues augmented with ultrasound, *Separation and Purification Technology*, 115, 66-72, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.04.043>.
- [12] P. Xing, B. Ma, P. Zeng, C. Wang, L. Wang, Y. Zhang, Y. Chen, S. Wang and Q. Wang, Deep Cleaning of a Metallurgical leaching residue and recovery of valuable metals, *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 24(11), 1217-1227, 2017. <https://doi.org/10.1007/s12613-017-1514-2>.
- [13] E. A. Ajiboye, P. K. Panda, A. O. Adebayo, O. O. Ajayi, B.C. Tripathy, M. K. Ghosh and S. Basu, Leaching kinetics of Cu, Ni and Zn from waste silica rich integrated circuits using mild nitric acid, *Hydrometallurgy* 188 (2019) 161–168. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.06.016>.
- [14] E. Güler, Çinko tesisi liç artıklarından metal kazanım yöntemlerinin araştırılması. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2008.
- [15] Y. Zhang, X. Yu and X. Li, Zinc recovery from franklinite by sulphation roasting, *Hydrometallurgy*, 109(3), 211-214, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.07.002>
- [16] M.A. Topçu, A. Rüßen and Ö. Küçük, Treatment of copper converter slag with deep eutectic solvent as green Chemical, *Waste Management*, 132, 64-73, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.07.022>.

- [17] A. Kilicarlan, M.N. Saridede, S. Stopic, and B. Friedrich, Use of ionic liquid in leaching process of brass waste for copper and zinc recovery, *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 21(2), 138-143. 2014. <https://doi.org/10.1007/s12613-014-0876-y>
- [18] J. Chang, J. Peng, L. Zhang and J. Chen, *Drying, roasting, and calcining of minerals*, Springer International Publishing, Cham, 2016.
- [19] J. Song, C. Peng, Y. Liang, D. Zhang, Z. Lin, Y. Liao, and G. Wang, Efficient extracting germanium and gallium from zinc residue by sulfuric and tartaric complex acid. *Hydrometallurgy*, 202, 105599, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105599>.
- [20] T. Xiao, W. Mu, S. Shi, H. Xin, X. Xu, H. Cheng, S. Luo and Y. Zhai, Simultaneous Extraction of nickel, copper, and cobalt from low-grade nickel matte by oxidative sulfation roasting-water leaching process, *Minerals Engineering*, 174, 107254, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107254>.
- [21] Y. Li, H. Liu, B. Peng, X. Min, M. Hu, N. Peng, Y. Yuang and J. Lei, Study on separating of zinc and iron from zinc leaching residues by Roasting with ammonium sulphate, *Hydrometallurgy*, 158, 42-48, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.10.004>.
- [22] C.A. Pickles and O. Marzoughi, Thermodynamic investigation of the sulphation Roasting of electric arc furnace dust, *Minerals*, 9(1), 18, 2018. <https://doi.org/10.3390/min9010018>.
- [23] R. Wang, Y. Yang, C. Liu, J. Zhou, Z. Fang, K. Yan, L. Tian and Z. Xu, Recovery of lead and silver from zinc acid-leaching residue via a sulfation roasting and oxygen-rich chlorination leaching method, *Journal of Central South University*, 27(12), 3567-3580, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11771-020-4569-6>.
- [24] P. Masset, J. Poinso and J. Poignet, TG/DTA/MS study of the thermal decomposition of $\text{FeSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 83(2), 457 – 462, 2006. <https://doi.org/10.1007/s10973-005-7267-6>
- [25] M. A. Topçu, Anot çamuru liç solüsyonlarından metal geri kazanımı ve uygulamaları. Doktora Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2021.
- [26] H. Xie, X. Xiao, Z. Guo and S. Li, One-stage ultrasonic-assisted calcium chloride leaching of lead from zinc leaching residue, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 176, 108941, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.108941>.
- [27] A. U. Rehman, M. Z. Shah, A. Ali, T. Zhao, R. Shah, I. Ullah, H. Bilal, A.R. Khan, M. Iqbal, A. Hayat and M. Zheng, Thermochemical heat storage ability of $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ as potential long-term heat storage material, *International Journal of Energy Research*, 45(3), 4746 – 4754, 2021. <https://doi.org/10.1002/er.6077>.
- [28] G. V. T. Kurban, A. S. C. Rego, N. M. Mello, E. A. Brocchi, R. C. S. Navarro, R. F. M. Souza, Thermodynamics and kinetics modelling of the $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ thermal decomposition in the presence of a $\text{Pd}/\text{Al}_2\text{O}_3$ catalyst, *Energies*, 15(2), 548, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15020548>.
- [29] J. Straszko, M. Olszak-Humienik and J. Możejko, Kinetics of thermal decomposition of $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, *Thermochimica Acta* 292(1), 145-150, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(96\)03114-0](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(96)03114-0).
- [30] H. Han, W. Sun, Y. Hu, B. Jia and H. Tang, Journal of Hazardous Materials, Anglesite and silver recovery from jarosite residues through roasting and sulfidization-flotation in zinc hydrometallurgy, 278, 49-54, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.05.091>.
- [31] M. R. C. Ismael and J. M. R. Carvalho, Iron recovery from sulphate leach liquors in zinc hydrometallurgy *Minerals Engineering*, 16(1), 31-39, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(02\)00310-2](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(02)00310-2).
- [32] L. Hoeber and S. Steinlechner, A comprehensive review of processing strategies for iron precipitation residues from zinc Hydrometallurgy, *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100214, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100214>.
- [33] E. Rudnik, Recovery of zinc from zinc ash by leaching in sulphuric acid and electrowinnig, *Hydrometallurgy* 188, 256-263, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.07.006>.





Yük frekans kontrol sistemlerinde gürbüz kararlılık zaman gecikmesi paylarının belirlenmesi

Determination of the robust stability delay margins for the load frequency control systems

Kübra Nur Gül^{1,*}, Şahin Sönmez², Saffet Ayasun³

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

² Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Yeşilyurt Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü, 06500, Malatya Türkiye

³ Gazi Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 44900, Ankara Türkiye

Öz

Bu çalışma, zaman gecikmesi içeren Yük Frekans Kontrol (YFK) sistemlerinde parametrik belirsizliklerin olması durumunda sistemin gürbüz kararlılık gecikme payı değerlerini hesaplamayı amaçlamaktadır. YFK sistemlerinde frekans kararlılığının sürdürülmesi bakımından çeşitli elektrik verilerinin ölçülerek kontrol merkezine iletilmesi ve kontrol merkezinden frekans kontrol servisine katılım sağlayan santrallere kontrol sinyallerinin iletilmesi gerekmektedir. Bu süreçte, haberleşme ağlarında veri iletimi nedeniyle, zaman gecikmeleri kaçınılmaz hale gelmektedir ve sistemin dinamik performansı ve kararlılığı olumsuz etkilenmektedir. Ayrıca, YFK sisteminin modellenmesinden kaynaklı ve güç sisteminde oluşabilecek belirsizlikler nedeniyle sistem parametrelerinin belirsizlikleri dikkate alınarak haberleşme ağ tabanlı gözlemlenebilecek gecikme değerleri üzerinde böylece belirsizliklerin etkisi incelenmelidir. Bu amaçla, YFK sisteminde üstel terimin yok edilmesi yöntemi ile Kharitonov Teoremi birlikte kullanılarak sistemin gürbüz kararlılığını sağlayabilen gürbüz zaman gecikme payı değerlerinin teorik olarak hesaplanması sağlanmıştır. Aynı zamanda Matlab/Simulink programı ve QPmR (Quasi Polynomial Mapping Root Finder) algoritması kullanılarak elde edilen teorik sonuçların doğruluğu kanıtlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Yük frekans kontrol sistemi, Haberleşme zaman gecikmesi, Kharitonov teoremi, Üstel terimlerin yok edilmesi yöntemi

1 Giriş

Elektrik güç sistemlerinin sahip oldukları frekans değerini nominal düzeyde tutmak için elektrik şebekesinin günlük çalışması sırasında güç üretimi ve yük talebi arasındaki dengenin sağlanması oldukça önemlidir. Bu amaçla yük frekans kontrol (YFK) sistemleri elektrik güç sistemlerinin kararlılığı ve güvenilirliği sağlamak ve sistem frekansında oluşabilecek bozulmaları ortadan kaldırmak için uzun yıllardan beri yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [1, 2]. Güç sistemlerinde herhangi bir bozucu etki sonrası frekans

Abstract

This study computes the robust stability delay margins of the time delayed load frequency control (LFC) system towards parametric uncertainties. The LFC systems are extensively equipped with communication networks to maintain the system frequency stability and to transmit/receive the measurement and control signals between the control central and generation units. However, network induced time delays due to the extensive utilization of communication networks are inevitable in LFC systems. Such delays could negatively affect the LFC system stability and could degrade the dynamical performance of system. Moreover, the parametric uncertainties are significant challenges for robust stability of the LFC system. Therefore, the effect of parametric uncertainties on the communication delay values could be investigated. For this purpose, this study determines the robust stability delay margin of LFC system by cooperating the direct method and Kharitonov theorem. The accuracy of theoretical computations is verified by the time domain simulations and QPmR algorithm.

Keywords: Load frequency control, Communication time delay, Kharitonov theorem, Direct method.

kararlılığının sürdürülmesinde, ölçülen çeşitli verilerin ve kontrol sinyallerinin iletilmesinde haberleşme ağları yoğun olarak kullanılmaktadır [3-5]. Elektrik güç santrallerinde çeşitli elektriksel veriler ölçülerek kullanılan haberleşme ağları ile merkezi denetleyici birimine gönderilmektedir. Bu denetleyici merkezinden frekans kontrolü içeren santrallere kontrol sinyallerinin aktarılması esnasında ihmal edilemeyecek boyutta haberleşme zaman gecikmelerinin olduğu gözlenmektedir. Bu zaman gecikmelerinin boyutu, sinyallerin aktarılmasını sağlayan haberleşme ağ yapısına, protokolüne, yüküne ve iletilen bilginin veya kontrol

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: kubragul@ohu.edu.tr (K. N. Gül)

Geliş / Received: 12.12.2023 Kabul / Accepted: 15.02.2024 Yayımlanma / Published: 15.04.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1403702

sinyalinin paket büyüklüğüne göre değişim göstermektedir. Dolayısıyla, gözlemlenen zaman gecikmeleri sistemin dinamiğini ve kararlılığını olumsuz etkileyebilir [3].

Son yıllarda oldukça dikkat çeken Elektrikli Araçların (EA) frekans kontrol servislerine katılımı [6-9] veya YFK sisteminde yükün sisteme dâhil edileceği zaman aralıklarının programlandığı Dinamik Talep Cevabı (DTC) kontrol teknikleri [10-12] oldukça ilgi gören önemli YFK teknikleri olmuştur. Her ne kadar yeni kontrol teknikleri, güç sistemlerinin kararlılığını ve güvenilirliğini iyileştirmek için YFK sistemlerine dâhil edilse de, haberleşme ağ tabanlı gözlemlenen zaman gecikmeleri önemli bir problem olarak görülmüştür.

Elektrik güç sistemlerinin zaman gecikmesi üst sınır değerlerini hesaplamak için zaman düzleminde ve frekans düzleminde olmak üzere iki ayrı grupta yöntemler kullanılmaktadır. Frekans düzleminde sık kullanılan yöntemler grubunda;

1. Üstel Terimin Yok Edilmesi Yöntemi [5, 13],
2. Kritik Özdeğerlerin İzlenmesi Yöntemi [14],
3. Frekans Tarama Yöntemi [15],
4. Rekasius Yerine Koyma Yöntemi [16, 17]

bulunmaktadır.

Sunulan bu yöntemler ve bu yöntemlerin haricinde frekans düzleminde kullanılan pek çok yöntem, [18] tarafından yapılan derleme çalışmasında sunulmuştur. Frekans düzlemi üzerine uygulanan yöntemler, zaman gecikmesi sabit olan sistemlerin kararlılık analizi için kullanılmakta olup bu uygulanan yöntemlerin ortak noktası, sistemin sınırdaki kararlı olmasını sağlayacak bütün imajiner kökleri belirleyebilmeleridir. Mevcut literatür çalışmaları incelendiğinde, Rekasius yerine koyma yöntemi ve üstel terimlerin yok edilmesi, klasik YFK sistemlerinde [5], EA içeren YFK sistemlerde [8, 19-21], DTC içeren YFK sistemlerde [10], talep yanıtı ve kesir dereceli oransal integral kontrolör içeren YFK sistemlerde [22], mikro şebeke sistemlerinde [23, 24] zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizlerinin yapıldığı çalışmalarda olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Güç sistemlerinin zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizinde son yıllarda yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde belirtilen yöntemler arasında uygulanma kolaylığı, hesaplama zamanları ve teorik olarak elde edilen sonuçların doğruluğu bakımından üstel terimlerin yok edilmesi yönteminin, diğer yöntemlere göre en uygun yöntem olduğu görülmektedir. [5, 20, 23].

Zaman düzleminde tanımlanan yöntemler ise doğrusal matris eşitsizlikleri ile birlikte kullanılan Lyapunov-Krasovskii ve Lyapunov-Razumikhin teoremlerini temel almaktadır [25, 26]. Bu grupta yer alan yöntemler, doğrusal matris eşitsizlik teknikleri yardımıyla kararlılık gecikmesi payı değerlerini hesaplar. Bu yöntemler ile EA içeren ve klasik yük frekans kontrol sistemi içerisinde zaman gecikmelerinin sabit ya da değişken olması halinde sistemi sınırdaki kararlı yapacak zaman gecikmesi değerleri teorik olarak hesaplanmıştır [4, 7, 25, 27]. Ancak, zaman düzlemindeki bu yöntemler frekans düzlemindeki yöntemler ile kıyaslandığında kararlılık gecikme payının gerçek değerinden daha küçük değerler vermektedir [4, 7, 8].

Zaman gecikmeli güç sistemlerinde kararlılık gecikme payı hesaplanması üzerine sunulan literatürdeki tüm çalışmaların ortak amacı nominal sistem parametreleri dikkate alınarak belirli bir denetleyici parametre seti için kararlılık gecikme üst sınırı değerlerinin hesaplanmasını sağlamaktır. Ancak, parametrik belirsizlikler, yük değişimi ve modelmeden kaynaklanan birçok belirsizliğin var olması elektrik güç sistemlerinde karşılaşılan önemli bir sorun olarak rapor edilmektedir [28-32]. Ayrıca, ayarlanabilir olan bu kontrolör kazanç değerleri için sistem parametreleri ve zaman gecikmesinde olası belirsizlik durumları için, güç sisteminin gürbüz zaman gecikmesi üst sınır değerlerinin hesaplanması üzerine dayalı gürbüz bir zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizi yapılmalıdır [28].

Şimdiye kadar yapılan pek çok çalışmada, YFK sistemlerinin denetleyici parametrelerinin tasarımı üzerine gürbüz kararlılık analizi sunulmuştur. Gürbüz denetleyici parametre tasarımı sunulan çalışmalarda, Kharitonov Teoreminin etkin bir şekilde uygulandığı görülmektedir [29-31]. Bu teoreme göre, katsayıların belirli bir aralıkta değişmesi ile elde edilen aralık polinomlarından, belirlene katsayı aralıklarının minimum ve maksimum değerlerinden yola çıkarak, vertex polinomlar tanımlanır. Elde edilen olası tüm vertex polinomlarının Hurwitz anlamında kararlılığı test edilerek gürbüz bir kararlılık analizi yapılabilir [34]. [29-31]'da sunulan çalışmalarda YFK sistemlerinin gürbüz kararlılığını garanti eden oransal-integral (PI) denetleyici kazanç değerlerinin bir seti belirlenmiştir. [32]'de sunulan çalışmada YFK sistemlerinde kesir dereceli PI denetleyici parametrelerinin tasarımı yapılmıştır. [33]'te sunulan çalışmada EA içeren YFK sistemlerinin gürbüz kararlılığını sağlayan PI denetleyici düzleminde gürbüz kararlılık bölgelerinin elde edildiği görülmektedir. Literatürde sunulan çalışmalar incelendiğinde, gürbüz kararlılık gecikme payının hesaplanması üzerine herhangi bir çalışma mevcut değildir. Parametrik değişimler göz önüne alındığında gürbüz zaman gecikmesi problemlerini çözmek amacıyla, bu çalışmada Kharitonov teoremi ile birlikte üstel terimlerin yok edilmesi yöntemleri birleştirilerek hibrit bir yöntem üzerinden YFK sisteminin gürbüz kararlılık gecikme paylarının hesaplanması amaçlanmaktadır. Bu kapsamda, bu çalışmanın literatüre önemli katkıları üstel terimlerin yok edilmesi yöntemini ve Kharitonov teoremini birleştirilerek belirli bir denetleyici parametre seti için iki bölgeli YFK sisteminin gürbüz zaman gecikmesi üst sınırı değerinin hesaplanmasını sağlamak ve gürbüz zaman gecikmesi payı değerleri üzerinde parametrik belirsizliklerin etkisini incelemektir. Son olarak elde edilen teorik sonuçların doğrulanması açık erişime sahip QPmR (Quasi Polynomial Mapping Root Finder) algoritması [35] ve MATLAB/Simulink ortamında [36] oluşturulan benzetim çalışmaları yardımıyla gösterilecektir.

2 Zaman gecikmeli yük frekans kontrol sistemi

Şekil 1'de her bir kontrol bölgesi içerisinde zaman gecikmesi bulunan iki bölgeli YFK sisteminin blok diyagramı görülmektedir. Şekil 1'den görüleceği üzere, YFK sistemini oluşturan her bir bloğun birinci dereceden transfer fonksiyonları kullanılarak doğrusal dinamik modelinin elde

edildiği görülmektedir. Sistem modelinde, D_i , M_i , R_i , β_i , T_{I2} , T_{gi} ve T_{chi} ($i=1,2$) sırası ile her bir kontrol bölgesinin jeneratör sönüm katsayısı, jeneratör eylemsizlik moment, hız regülasyon düşüşü veya yüzdesi, frekans yönelim faktörü, bağlantı hattı senkronizasyon katsayısı, devir sayısı regülatörü ve türbin zaman sabitleridir. Ayrıca, Δf_i , ΔP_{vi} , ΔP_{di} , ΔP_{mi} , ΔP_{L2} ve ACE_i sırasıyla her bir kontrol bölgesinin frekansı, valf konumunu, yükteki değişimi, jeneratör mekanik gücü, bağlantı hattı güç değişimini ve alan kontrol hata sinyalini temsil etmektedir. Kontrol merkezi ve üretim santralleri arasında haberleşme ağı tabanlı gözlemlenecek olan zaman gecikmesi ifadesi sekonder kontrol çevrimine girilerek $e^{-s\tau_i}$ ile gösterilmiştir. Burada, τ_i ($i=1,2$) her bir kontrol bölgesinde gözlemlenecek toplam zaman gecikmesini ifade etmekte ve sabit bir değer olarak varsayılmıştır [5], [8]. Son olarak, sekonder kontrol çevrimi tarafında bulunan K_{pi} ve K_{Ii} ($i=1,2$) parametreleri PI denetleyici kazanç değerlerini göstermektedir. Her bir bölgedeki denetleyici kazançlarının birbirine eşit olduğu kabul edilmiştir. Şekil 1’de verilen iki bölgeyi YFK sistemine Kharitonov teoremini uygulamak ve gürbüz zaman gecikmesi değerlerini hesaplamak için öncelikle her bir bölgenin parametrik belirsizlikler içeren karakteristik denkleminin elde edilmesi gereklidir. İki bölgeyi YFK sisteminin zaman gecikmesi bakımından kararlılık analizi incelendiğinde, bölgeler arasındaki bağlantı hattı güç değişiminin etkisinin düşük olduğundan [21], her iki frekans kontrol bölgesi birbirinden ayrılarak sistemin herhangi bir bölgesinin zaman gecikmeli karakteristik denklemi aşağıda verildiği gibi elde edilebilir.

$$\Delta(s, \tau) = P(s) + F(s)e^{-s\tau} = 0 \quad (1)$$

Burada, $P(s)$ ve $F(s)$ reel katsayılarla sahip polinomları temsil etmekte olup bu polinomlar ve sahip oldukları katsayılar aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$P(s) = p_4s^4 + p_3s^3 + p_2s^2 + p_1s \quad (2)$$

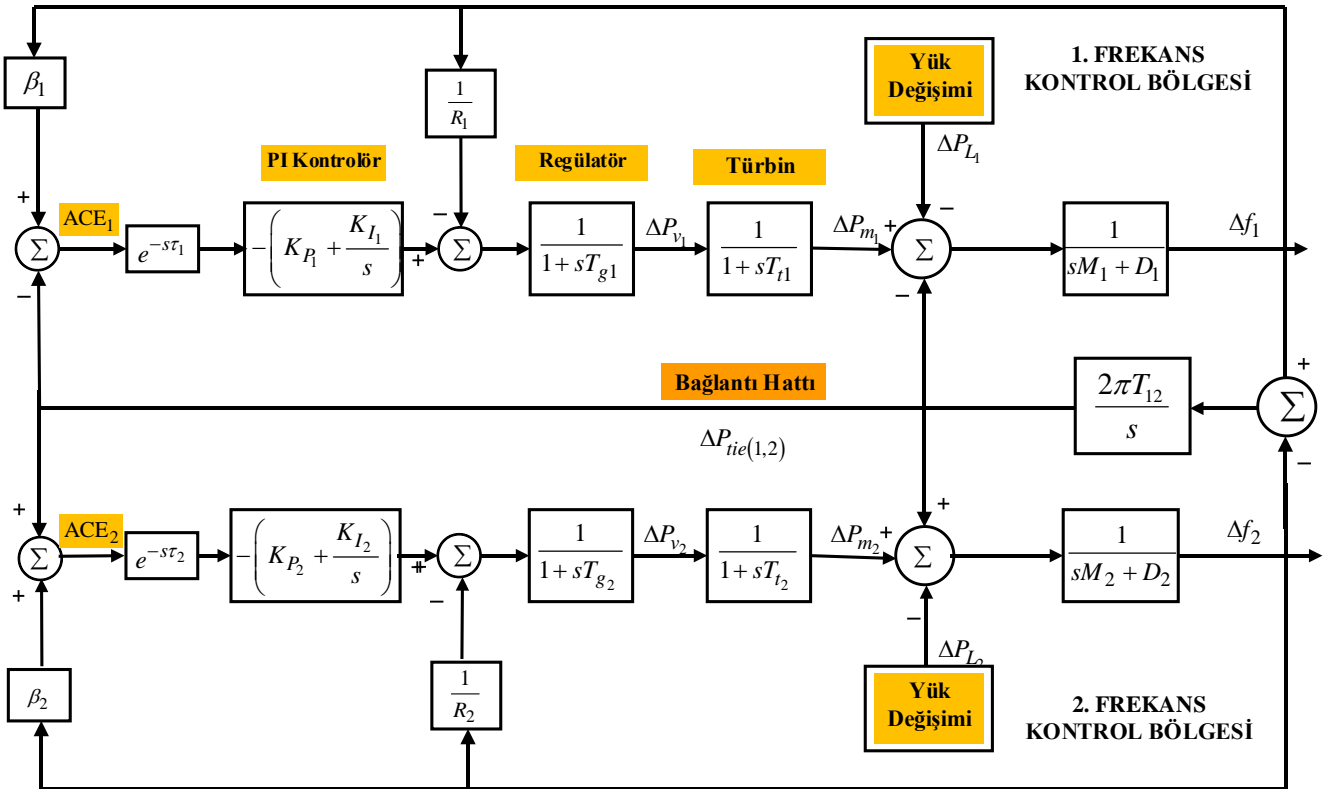
$$F(s) = \beta(K_p s + K_I)$$

Denklem (2)’de verilen $P(s)$ polinomu sistem parametrelerini içeren ve sistemin gürbüz kararlılık analizinin yapılabilmesi için sadece bu polinomda yer alan parametrelerde belirsizlikler olacağı dikkate alınmaktadır. Böylesi bir polinom katsayıları belirli bir aralıkta değişen dört adet köşe polinomun tanımlanmasını sağlamaktadır. Burada, $F(s)$ denetleyici parametrelerini içeren ve herhangi bir belirsizlik uygulanmayan sabit bir polinomdur. Dolayısıyla, parametrik belirsizliklerin uygulanabileceği $P(s)$ polinomunun her bir kontrol bölgesi için genel formda verilen sistem parametreleri cinsinden katsayıları aşağıda elde edilmiştir.

$$p_4 = T_{gi}T_{chi}M_i, p_3 = T_{chi}M_i + T_{gi}T_{chi}D_i + M_iT_{gi}$$

$$p_2 = M_i + D_iT_{gi}, p_1 = D_i + 1/R_i \quad (3)$$

$$i = 1, 2.$$



Şekil 1. İki bölgeyi yük frekans kontrolü sistemi blok diyagramı

3 Parametrik belirsizlikler karşısında YFK sisteminin gürbüz zaman gecikmesi değerlerinin belirlenmesi

3.1 Kharitonov teoremi

Kharitonov teoremi parametreleri belirli bir aralıkta değişen polinomların gürbüz kararlılığının belirlenmesinde gerekli ve yeterli şartların incelenmesini sağlar. **Denklem (1)**'de verilen karakteristik polinomda parametrik belirsizlikler içeren $P(s)$ polinomu için belirli bir aralıkta parametrik değişimler uygulanarak, bir dörtgenin köşe noktalarına karşılık gelen Kharitonov teoremine dayalı dört adet polinom tanımlanabilir. Böylesi bir polinom aralık polinom olarak adlandırılabilir ve **Şekil 2**'de $\omega > 0$ için $P(s)$ polinomunun kompleks düzlemde bir dörtgenin köşelerine karşılık gelen dört köşe polinomu gösterilebilir. Bu polinomların her birinin Hurwitz kararlılık şartlarını yerine getirmesi halinde YFK sisteminin gürbüz anlamda kararlılığı incelenir. **Denklem (1)**'de verilen karakteristik denklemde $P(s)$ polinomuna Kharitonov teoremini uygulamak için aşağıdaki tanım yapılabilir.

Tanım 1: **Denklem (1)**'de önceden tanımlanmış parametrik sınırlar altında $P(s)$ polinomu için aşağıda verilen bir dörtgenin dört köşe noktasını oluşturan Kharitonov polinomları oluşturulabilir.

$$\begin{aligned} K_p^1(s) &= (p_4^+ s^4 + p_3^- s^3 + p_2^- s^2 + p_1^+ s) \\ K_p^2(s) &= (p_4^+ s^4 + p_3^+ s^3 + p_2^- s^2 + p_1^- s) \\ K_p^3(s) &= (p_4^- s^4 + p_3^+ s^3 + p_2^+ s^2 + p_1^- s) \\ K_p^4(s) &= (p_4^- s^4 + p_3^- s^3 + p_2^+ s^2 + p_1^+ s) \end{aligned} \quad (4)$$

Burada, - ve + indisler $P(s)$ aralık polinomu için **Denklem (2)** ve **(3)**'te verilen p katsayılarının alt ve üst limitlerini göstermektedir. $P(s)$ polinomu için $p_k \in [p_k^-, p_k^+]$ ($k=1,2,3,4$) bir aralıkta belirsizliğin alt ve üst limit değerleri tanımlanabilir. YFK sisteminin karakteristik denklemi Kharitonov köşe polinomları dikkate alınarak aşağıda verildiği gibi yazılabilir.

$$\Delta_{V_i}(s, \tau) = K_p(s) + F(s)e^{-s\tau} = 0 \quad (5)$$

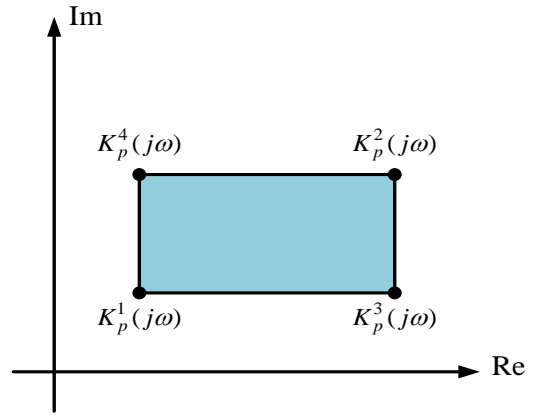
Burada, $K_p(s) = \{K_p^i(s)\}$ ($i=1,2,3,4$) $P(s)$ polinomu ile oluşturulan dört ayrı Kharitonov polinomlarının bir setidir. Bu polinomlar $\Delta_V \in \{\Delta_{V_1}, \Delta_{V_2}, \Delta_{V_3}, \Delta_{V_4}\}$ olarak tanımlanır. Seçilen denetleyici kazanç değerleri için bu polinomların her biri klasik Hurwitz kararlılık kriterini sağlaması halinde YFK sisteminin gürbüz anlamda kararlı olduğu söylenebilir. Aynı zamanda, seçilen denetleyici kazançları tanımlanan belirsizlik sınırlarında zaman gecikmesi içeren veya içermeyen YFK sistemini gürbüz olarak kararlı kılmaktadır.

Kharitonov köşe polinomları dikkate alınarak parametrik belirsizliklere sahip $\Delta_V(s, \tau)$ için aşağıdaki varsayımlar geçerlidir.

Varsayım 1: (4)'de verilen $K_p(s)$ 'in her bir katsayısı tanımlanan aralıklarda birbirinden bağımsız olarak değişir.

Varsayım 2: $\Delta_V(s, \tau)$ karakteristik denkleminin Kharitonov polinomları seti için derecesi değişmemektedir. Dolayısıyla, $0 \notin [p_k^-, p_k^+]$ ($k=1,2,3,4$) olduğu varsayılır.

Bu varsayımlar Kharitonov teoremini YFK sistemine uygulanması bakımından önemlidir. Sistem parametrelerinin belirsizlik aralığı tanımlandığında YFK sisteminin gecikme değerleri Kharitonov teoremi ile elde edilen her bir köşe polinom için değişecektir. Bu anlamda, üstel terimlerin yok edilmesi yöntemi parametrik belirsizlikler içeren YFK sisteminin gecikmeye bağlı gürbüz kararlılık analizini incelemek ve (5)'te verilen dört köşe polinomunun kararlılığını sağlayan gürbüz zaman gecikmesi üst sınırı değerlerini hesaplamak için kullanılabilir.



Şekil 2. $\omega > 0$ için Kharitonov köşe polinomları

3.2 Gürbüz kararlılık gecikme payının hesaplanması: Üstel Terimlerin Yok Edilmesi Yöntemi

Zaman gecikmeli YFK sisteminin kararlılığı gecikmeye bağlı ve gecikmeden bağımsız kararlılık durumları altında incelenebilir. YFK sistemi, girilen sonlu gecikme değerleri karşısında kararlılığını sürdürüyorsa YFK sisteminin gecikmeden bağımsız kararlı olduğu bilinir. Diğer durumda, YFK sistemine girilen $\tau_c < \tau$ gecikme değerlerinde sistemin kararlılığı olumsuz olarak etkileniyorsa, YFK sisteminin gecikmeye bağlı kararlı olduğu söylenebilir. Burada, τ_c , YFK sisteminin sanal eksen üzerinde kritik köklerine ($s = j\omega_c$) karşılık gelen kararlılık gecikme payı olarak tanımlanmaktadır. Girilen gecikme değeri, kararlılık gecikme payından büyük olması ($\tau > \tau_c$) halinde sistem kararsız olmaktadır. YFK sistem parametreleri belirli bir aralıkta değiştirildiğinde **Denklem (5)**'ten görüldüğü üzere dört adet Kharitonov polinomu elde edilecektir. Başlangıçta $\tau = 0$ 'da, seçilen denetleyici kazanç değerlerinde ve sistemin girilen parametrik belirsizlik sınırlarında tüm Kharitonov

polinomlarının kararlı olduğu kabul edilsin. Aslında, belirsizlikler içeren bir YFK sisteminin zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizini değerlendirmek için böylesi bir varsayım gereklidir. Aynı zamanda, seçilen denetleyici kazanç değeri için $\tau=0$ 'da tüm Kharitonov polinomları Hurwitz kararlılık şartlarını sağlaması halinde YFK sisteminin gürbüz anlamda kararlı olduğu sonucuna ulaşılabilir.

Yöntemin ilk amacı karakteristik denklemde bulunan üstel terimin yok edilmesi ve klasik bir polinom elde edilmesini sağlamaktır. Bu doğrultuda, sistemin karakteristik denkleminin sanal eksen üzerinde $s = j\omega_c$ ve $s = -j\omega_c$ olarak kompleks eşlenik kök çifti olması özelliğinden faydalanılarak Denklem (5)'te verilen polinom setinin herhangi biri için aşağıda verilen polinom çifti yazılabilir [5, 13].

$$\begin{aligned}\Delta_{V_i}(j\omega_c, \tau) &= K_p^i(j\omega_c) + F(j\omega_c)e^{-j\omega_c\tau_c} = 0 \\ \Delta_{V_i}(-j\omega_c, \tau) &= K_p^i(-j\omega_c) + F(-j\omega_c)e^{j\omega_c\tau_c} = 0\end{aligned}\quad (7)$$

Burada, $K_p^i(\bullet)$ ($i=1,2,3,4$), Denklem (5)'in i . köşe polinomunu göstermektedir. $e^{-j\omega_c\tau_c}$ ve $e^{j\omega_c\tau_c}$ üstel terimleri Denklem (7) kullanılarak elimine edilebilir. Bu eliminasyon sonrasında üstel terimler içermeyen klasik polinom aşağıda verildiği gibi belirlenebilir.

$$W(\omega_c^2) = K_p^i(j\omega_c)F(-j\omega_c) - K_p^i(-j\omega_c)F(j\omega_c) = 0 \quad (8)$$

Dikkat edilecek olunursa Denklem (8) herhangi bir yaklaşık ifade kullanılmadan tam bir şekilde sonuçlanmıştır. Bu denklem ifadesi kullanılarak sistemin sanal eksen kesen kritik kökleri hesaplanabilir. Denklem (8)'in açık ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$W(\omega_c^2) = t_8\omega_c^8 + t_6\omega_c^6 + t_4\omega_c^4 + t_2\omega_c^2 + t_0 = 0 \quad (9)$$

Denklem (9)'un katsayıları:

$$\begin{aligned}t_8 &= p_4^2, \quad t_6 = -p_3^2 - 2p_2p_4, \quad t_4 = p_2^2 - 2p_3p_1, \\ t_2 &= p_1^2 - q_1^2, \quad t_0 = -q_0^2.\end{aligned}$$

Denklem (9)'dan elde edilen köklerden yola çıkılarak YFK sisteminin gecikmeye bağlı veya gecikmeden bağımsız kararlılık durumlarının incelenmesi gerçekleştirilebilir. Denklem (9)'un çözümünden herhangi bir pozitif reel kök elde edilmediği durumda, sistem gecikmeden bağımsız kararlıdır. Denklem (9)'un çözümünden en az bir adet reel kök elde edilmesi halinde, YFK sistemi gecikmeye bağlı kararlı olup sistem sonlu zaman gecikmesi τ_c değerinde sanal eksen üzerinde köklere sahip olur. Ayrıca, Denklem (9)'un elde edilen pozitif reel kökü Denklem (1)'in sanal eksen kesen köküne karşılık gelmektedir.

Denklem (9), reel bir köke (ω_c) sahip olması durumunda YFK sisteminin kararlı gecikme payı değeri τ_c Denklem (10) yardımıyla elde edilebilir [5, 13].

$$\tau_c = \frac{1}{\omega_c} \text{Tan}^{-1} \left\{ \frac{\text{Im} \left\{ \frac{K_p^j(j\omega_c)}{F(j\omega_c)} \right\}}{\text{Re} \left\{ -\frac{K_p^j(j\omega_c)}{F(j\omega_c)} \right\}} \right\} + \frac{2r\pi}{\omega_c}, \quad (10)$$

$r = 0, 1, 2, \dots, \infty$

Sonuç olarak, önerilen yöntem Denklem (5)'te tanımlanan dört Kharitonov köşe polinomunun her birine uygulanarak parametrik belirsizliklere sahip YFK sisteminin gürbüz kararlılık gecikme payı değerlerinin hesaplanması sağlanabilir. Dolayısıyla, Denklem (5)'te köşe polinomları setine karşılık gelen gecikme değerlerinin seti aşağıda verildiği gibi tanımlanabilir.

$$\tau_V = \{ \tau_{V_{c1}}, \tau_{V_{c2}}, \tau_{V_{c3}}, \tau_{V_{c4}} \} \quad (11)$$

Denklem (11)'de verilen gecikme değerlerinden en küçük olanı aralık polinomlu YFK sisteminin tüm köşe polinomlarının kararlılığını sağlayan gürbüz kararlılık gecikme değeri olacaktır. Bu gecikme değeri aşağıda ifade edilmiştir.

$$\tau_{Vc} = \min \{ \tau_V \} \quad (12)$$

4 Teorik ve benzetim sonuçları

Bu bölümde, YFK sisteminin parametrik belirsizliklere sahip olması halinde, sistemin her bir kontrol bölgesi için ayrı ayrı gürbüz zaman gecikmesi değerleri Bölüm 3'de verilen yöntemler uygulanarak teorik olarak elde edilmiştir. Daha sonra, elde edilen teorik sonuçların doğrulanmasını göstermek amacıyla farklı senaryolar altında benzetim çalışmaları uygulanmıştır. İki bölgeli YFK sisteminin her bir kontrol bölgesine ait nominal sistem parametreleri ve değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. İki bölgeli YFK sistem parametre değerleri

Parametre	$T_{chi}(s)$	$T_g(s)$	R	D	β_i	M
Bölge 1	0.3	0.1	0.05	1	21	10
Bölge 2	0.4	0.17	0.05	1.5	21.5	12

Bölüm 3'te sunulan üstel terimlerin yok edilmesi yönteminin ve Kharitonov teoreminin YFK sistemine uygulanarak gürbüz kararlılık gecikme payı değerlerinin hesaplanma aşamaları aşağıda adım adım gösterilmiştir.

1. Adım: Tablo 2’de verilen YFK sistemin 1. kontrol bölgesinin nominal parametreleri için, $\delta = \pm 5\%$ parametrik belirsizlik tanımlanmış öncelikle Tablo 1’de verilen parametre değerlerinin alt ve üst limitleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

Bölge-1 için;

$$T_{ch} = [0.285; 0.315], T_g = [0.095; 0.105], R = [0.0475; 0.0525]$$

$$D = [0.95; 1.05], M = [9.5; 10.5]$$

Bölge-2 için;

$$T_{ch} = [0.38; 0.42], T_g = [0.1615; 0.1785], R = [0.0475; 0.0525]$$

$$D = [1.425; 1.575], M = [11.4; 12.6]$$

Bu parametre değerlerine bağlı olarak ve PI denetleyici parametre değerleri $K_P=0.2$, $K_I=0.2$ için Denklem 4’te verilen dört Kharitonov polinomunda yer alan sistem parametrelerinin alt ve üst limit değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$p_1 = [19.9976; 22.1076], p_2 = [9.8610; 10.9410]$$

$$p_3 = [3.6357; 4.4447], p_4 = [0.2572; 0.3473]$$

2. Adım: Denklem (4)’te verilen dört adet Kharitonov polinomu ve Denklem (5)’te verilen Kharitonov karakteristik denklemleri aşağıda verildiği elde edilmiştir.

$$K_p^1(s) = (0.3473s^4 + 4.4447s^3 + 9.8610s^2 + 19.9976s)$$

$$K_p^2(s) = (0.2572s^4 + 4.4447s^3 + 10.9410s^2 + 19.9976s)$$

$$K_p^3(s) = (0.3473s^4 + 3.6357s^3 + 9.8610s^2 + 22.1026s)$$

$$K_p^4(s) = (0.2572s^4 + 3.6357s^3 + 10.9410s^2 + 22.1026s)$$

3. Adım: 2. Adım ile elde edilen Kharitonov polinomlarının her birine Denklem (7) uygulandığında aşağıda verilen Denklem (8) ve (9)’da gösterilen aralık polinomlu YFK sisteminin klasik polinomları elde edilebilir.

- 1. Kharitonov Polinomu için;

$$t_8 = p_4^{+2}, t_6 = -p_3^{-2} - 2p_2^- p_4^+, t_4 = p_2^{-2} - 2p_3^- p_1^+,$$

$$t_2 = p_1^{+2} - q_1^2, t_0 = -q_0^2.$$

- 2. Kharitonov Polinomu için;

$$t_8 = p_4^{+2}, t_6 = -p_3^{+2} - 2p_2^- p_4^+, t_4 = p_2^{-2} - 2p_3^+ p_1^-,$$

$$t_2 = p_1^{-2} - q_1^2, t_0 = -q_0^2.$$

- 3. Kharitonov Polinomu için;

$$t_8 = p_4^{-2}, t_6 = -p_3^{+2} - 2p_2^+ p_4^-, t_4 = p_2^{+2} - 2p_3^+ p_1^-,$$

$$t_2 = p_1^{-2} - q_1^2, t_0 = -q_0^2.$$

- 4. Kharitonov Polinomu için;

$$t_8 = p_4^{-2}, t_6 = -p_3^{-2} - 2p_2^+ p_4^-, t_4 = p_2^{+2} - 2p_3^- p_1^+,$$

$$t_2 = p_1^{+2} - q_1^2, t_0 = -q_0^2.$$

Denklem (9)’ ile elde edilen her bir Kharitonov karakteristik denklemlerine ait sanal eksen kesen kökler aşağıda verildiği hesaplanmıştır.

$$[0.2159rad / s, 0.2156rad / s, 0.194rad / s, 0.193rad / s]$$

4. Adım: 3. Adım ile elde edilen her bir sanal eksen kesen kök için Denklem (10) kullanılarak Kharitonov köşe polinomları için aşağıda verildiği zaman gecikmesi üst sınırı değerleri belirlenebilir.

$$\tau_{V_{c1}} = 7.766s ; \tau_{V_{c2}} = 7.722s ; \tau_{V_{c3}} = 8.636s ; \tau_{V_{c4}} = 8.594s$$

5. Adım: YFK sisteminin Kharitonov köşe polinomları için belirlenen zaman gecikmesi üst sınır değerlerinden minimum olanı parametrik belirsizliklere sahip YFK sisteminin kararlılığını sağlayan gürbüz kararlılık gecikme payı değeri $\tau_V = 7.722s$ olmaktadır.

YFK sisteminin her iki kontrol bölgesinin gürbüz kararlılık gecikme payı değerlerini hesaplamak için PI denetleyici parametreleri $K_P=0-1.0$, $K_I=0.05-1.0$ aralıklarında seçilerek yukarıda verilen adımlar uygulanmış ve elde edilen teorik sonuçlar Tablo 2 ve 3’te gösterilmiştir. Ayrıca, sistemin parametrelerinin belirsizliği $\delta = \pm 10$ olması halinde her iki kontrol bölgesinin gürbüz kararlılık gecikme payı değerleri Tablo 4 ve 5’te verilmiştir. Tablo 2-5’te görüldüğü üzere elde edilen gürbüz kararlılık gecikme payı değerlerinden mavi renk ile vurgulanan değerler $\Delta_{V_1}(j\omega_c, \tau)$, yeşil renk ile gösterilen değerler $\Delta_{V_2}(j\omega_c, \tau)$ ve kırmızı renk ile vurgulanan değerler $\Delta_{V_3}(j\omega_c, \tau)$ Kharitonov karakteristik polinomlarından hesaplanmıştır. Tablolardan görüleceği üzere, pek çok gürbüz kararlılık gecikme değerinin Δ_{V_2} polinomu kullanılarak hesaplandığı tespit edilmektedir. [4], [5], [21] ve [24]’de sunulan çalışmalar nominal sistem parametreleri için bir bölgeyi YFK sistemine ait kararlılık gecikme payı değerleri hesaplanmıştır. Tablo 2’de verilen gürbüz kararlılık gecikme payı değerleri, belirtilen çalışmalarda elde edilen kararlılık gecikme payı değerleri ile kıyaslandığında parametrik belirsizliğin dikkate alındığı YFK sisteminde zaman gecikme değerlerinin sistemin gürbüzlüğünün sağlanması bakımından beklenildiği üzere daha düşük olduğu görülmektedir. Tablo 4 ve 5’te verilen $\delta = \pm 10$ parametrik belirsizlik durumunda elde edilen gürbüz kararlılık gecikme payı değerleri, Tablo 2 ve 3’te verilen sonuçlarla kıyaslandığında, belirsizlik oranının artmasıyla tüm PI denetleyici parametre değerlerine ait gürbüz kararlılık gecikme payı değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Teorik olarak elde edilen gürbüz kararlılık gecikme payı değerlerinin doğruluğunu kanıtlamak amacıyla $\delta = \pm 5$

parametrik belirsizliğinde, 1. frekans kontrol bölgesinde $K_P=0.2$, $K_I=0.2$ denetleyici kazanç değerinde benzetim çalışmaları yapılmış ve sistemin baskın köklerini görmek amacıyla QPmR algoritması sonuçları incelenmiştir. YFK sisteminin frekans yanıtının incelendiği tüm senaryolarda, $t=0$ anında $\Delta P_d = 0.05 pu$ yük bozucu etkisinin altında benzetim çalışmaları uygulanmıştır. Yöntemin uygulandığını gösteren hesaplama basamaklarında 4. Adımda görüldüğü üzere, $K_P=0.2$, $K_I=0.2$ denetleyici parametre değerleri için kararlılık gecikme payı değeri $\tau_c = 7.7220 s$ olarak elde edilmiş ve Tablo 2’de bu değer vurgulanmıştır. $K_P=0.2$, $K_I=0.2$ denetleyici kazançları ve gürbüz kararlılık gecikme payı YFK sistemine girilerek sistemin QPmR algoritması sonuçları ile birlikte 1. kontrol bölgesinin frekans tepkileri Şekil 3 ve 4’te sunulmuştur. Şekil 3’te YFK sisteminin tüm Kharitonov karakteristik polinomlarının baskın köklerinin dağılımı incelendiğinde, $\Delta_{V_2}(j\omega_c, \tau)$ Kharitonov karakteristik polinomunun sanal eksen üzerinde kökleri olduğu ve diğer polinomların baskın köklerinin kompleks düzlemin sol yarı kararlılık bölgesinde olduğu görülmektedir. Aynı zamanda, Şekil 4’te görüldüğü üzere, $\tau_c = 7.7220 s$ gürbüz kararlılık gecikme payı

değerinde $\Delta_{V_2}(j\omega_c, \tau)$ Kharitonov karakteristik polinomu haricinde diğer üç polinomda sistemin frekans değişiminin giderek sönümlendiği görülmektedir. $\Delta_{V_2}(j\omega_c, \tau)$ Kharitonov karakteristik polinomunda YFK sisteminin frekansının sürekli salınımlarından dolayı sınırda kararlı olduğu görülmektedir.

Yapılan bir diğer doğrulama çalışması $\delta = \pm 5$ belirsizlik sınırları içerisinde, sistem parametrelerinin maksimum, minimum ve nominal parametre durumlarında YFK sisteminin 1. kontrol bölgesinin frekans tepkisinin incelenmesidir. Şekil 5, belirtilen parametrik değişim durumlarına karşılık gelen frekans tepkilerini göstermektedir. Tablo 2’de verildiği üzere $K_P=0.2$, $K_I=0.2$ denetleyici kazanç değerinde YFK sisteminin gürbüz kararlılık gecikme payı değeri $\tau_c = 7.7220$ girildiğinde, her bir frekans yanıtında oluşan salınımların sönümlenerek sistemin kararlı olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, Şekil 4 ve 5’te YFK sisteminin gürbüz kararlılık gecikme payı değerinin tüm Kharitonov karakteristik polinomlarının kararlılığını ve sistemin gürbüz kararlılığını sağlandığını göstermektedir.

Tablo 2. $\delta = \pm 5$ parametrik belirsizlik oranında 1. Frekans kontrol bölgesine ait gürbüz kararlılık gecikme payı değerleri

τ_{Vc} (s)	K_I						
K_P	0.05	0.1	0.15	0.2	0.4	0.6	1
0	29.3631	14.3985	9.4057	6.9057	3.1353	1.8538	0.7481
0.05	30.3209	14.8774	9.7249	7.1450	3.2548	1.9332	0.7947
0.1	31.1902	15.3119	10.0145	7.3620	3.3628	2.0046	0.8344
0.2	32.6355	16.0340	10.4953	7.7220	3.5404	2.1201	0.8898
0.4	34.0860	16.7564	10.9736	8.0773	3.7053	2.2146	0.8666
0.6	32.7505	16.0793	10.5115	7.7192	3.4832	2.0135	0.5806
1	0.4429	0.4360	0.4286	0.4210	0.3874	0.3481	0.2660

Tablo 3. $\delta = \pm 5$ parametrik belirsizlik oranında 2. Frekans kontrol bölgesine ait gürbüz kararlılık gecikme payı değerleri

τ_{Vc} (s)	K_I						
K_P	0.05	0.1	0.15	0.2	0.4	0.6	1
0	29.2401	14.2689	9.2686	6.7605	2.9520	1.6210	0.2695
0.05	30.1978	14.7477	9.5877	6.9997	3.0712	1.6999	0.3146
0.1	31.0670	15.1821	9.8770	7.2163	3.1782	1.7694	0.3496
0.2	32.5119	15.9034	10.3565	7.5746	3.3517	1.8703	0.3885
0.4	33.9601	16.6213	10.8281	7.9205	3.4940	1.8692	0.3595
0.6	32.6171	15.9294	10.3433	7.5307	3.1256	0.7678	0.2794
1	0.3375	0.3285	0.3192	0.3097	0.2694	0.2270	0.1428

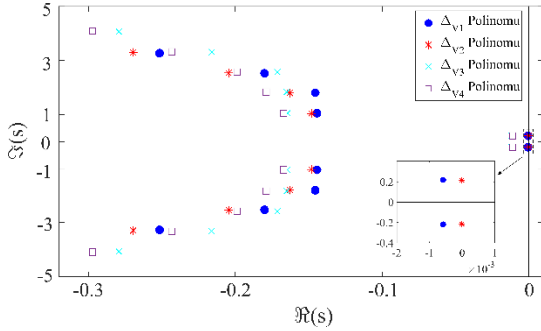
Tablo 4. $\delta = \pm 10$ parametrik belirsizlik oranında 1. Frekans kontrol bölgesine ait gürbüz kararlılık gecikme payı değerleri

τ_{Vc} (s)	K_I						
K_P	0.05	0.1	0.15	0.2	0.4	0.6	1
0	27.9378	13.6576	8.8924	6.5057	2.9028	1.6747	0.5185
0.05	28.8936	14.1354	9.2109	6.7446	3.0220	1.7539	0.5636
0.1	29.7562	14.5666	9.4982	6.9598	3.1290	1.8245	0.5984
0.2	31.1714	15.2735	9.9688	7.3120	3.3022	1.9368	0.6323
0.4	32.4583	15.9135	10.3914	7.6246	3.4429	1.9791	0.5276
0.6	30.6617	15.0025	9.7696	7.1428	3.0805	0.8952	0.3549
1	0.2585	0.2538	0.2490	0.2441	0.2231	0.2006	0.1539

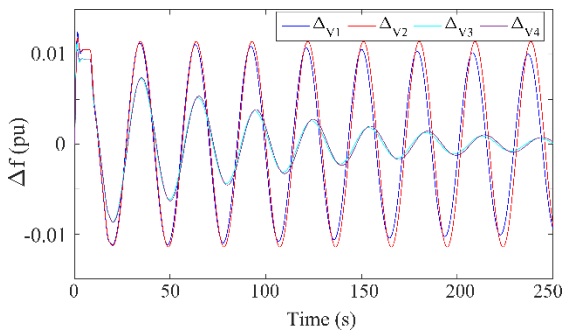
Tablo 5. $\delta = \pm 10$ parametrik belirsizlik oranında 2. Frekans kontrol bölgesine ait gürbüz kararlılık gecikme payı değerleri

τ_{Vc} (s)	K_I							
K_P	0.05	0.1	0.15	0.2	0.4	0.6	1	
0	27.7965	13.5108	8.7375	6.3415	2.6935	1.3666	*	
0.05	28.7521	13.9885	9.0559	6.5802	2.8123	1.4432	0.0074	
0.1	29.6146	14.4194	9.3428	6.7950	2.9181	1.5057	0.0464	
0.2	31.0291	15.1253	9.8117	7.1448	3.0861	1.5800	0.1024	
0.4	32.3125	15.7590	10.2251	7.4449	3.1969	1.2415	0.1434	
0.6	30.5034	14.8260	9.5698	6.9163	0.6652	0.3949	0.1230	
1	0.1397	0.1330	0.1263	0.1194	0.0910	0.0617	0.0030	

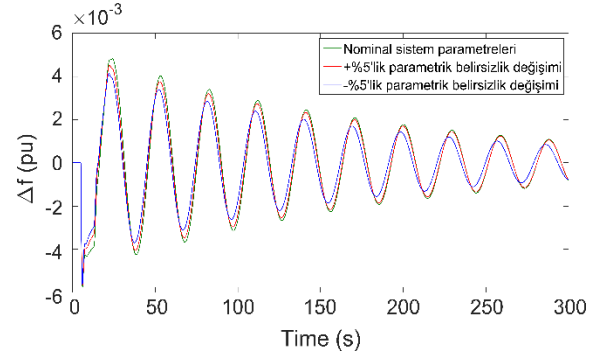
Şekil 4 ve 5'ten görülen sonuçlar, girilen gürbüz kararlılık gecikme payı değerleri hem denetleyici kazanç değerlerinin hem de sistem frekansının dinamik davranışının YFK sisteminin gürbüz çalışması ve kararlılığını sağladığını göstermektedir. Dikkat edilecek olunursa, Tablo 2-5'te sunulan gürbüz kararlılık gecikme payı değerleri iki YFK kontrol bölgesi arasında bağlantı hattı güç değişiminin olmadığı ($\Delta P_{12} = 0$) durumda elde edilmiştir. Elde edilen gürbüz kararlılık gecikme değeri üzerinde, bağlantı hattı güç değişiminin etkisini incelemek için her iki kontrol bölgesinde $\delta = \pm 5$ parametrik belirsizlik altında $K_P=0.2$, $K_I=0.2$ denetleyici kazanç değerlerinde Tablo 2 ve 3'ten her bir bölgenin gürbüz gecikme değeri üst sınırı $\tau_c = 7.7220s$ ve $\tau_c = 7.5746s$ olarak belirlenmiştir. Şekil 6, farklı bağlantı hattı güç değişimi durumlarında girilen gürbüz zaman gecikmesi değerinde sistemin kararlılığını sürdürdüğünü göstermekte olup, gürbüz zaman gecikmesi değeri üzerinde bağlantı hattı güç değişiminin etkisinin zayıf olduğu görülmektedir.



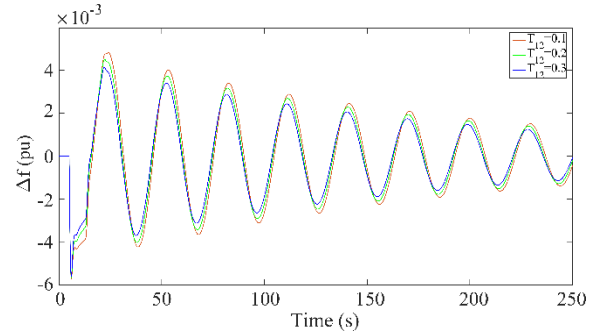
Şekil 3. YFK sisteminin her bir Kharitonov polinomunun dominant köklerin dağılımı



Şekil 4. YFK sisteminin her bir Kharitonov polinomu için sistemin frekans tepkisi



Şekil 5. YFK sisteminin farklı parametrik belirsizliklerinde sistemin frekans tepkisi



Şekil 6. İki bölge YFK sisteminde farklı bağlantı hattı güç değişimleri için sistemin frekans tepkisi

5 Sonuçlar

Bu çalışmada, parametrik belirsizliklere sahip YFK sisteminin gürbüz kararlılık gecikme payı değerleri üstel terimlerin yok edilmesi yöntemi ve Kharitonov teoremi kullanılarak elde edilmiştir. Parametrik belirsizliklere sahip YFK sisteminin parametrelerinin belirsizlik oranı arttıkça sistemin gürbüz kararlılık gecikme payı değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Benzetim çalışmaları sonucu YFK sisteminin teorik gürbüz zaman gecikmesi değerlerinin doğru olduğunu ve sistem frekansının farklı parametrik değişimler için kararlılığını sürdürdüğünü göstermiştir. Ayrıca, iki bölge YFK sisteminin gürbüz zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizini basitleştirmek amacıyla YFK sisteminin bağlantı hattı güç değişimi ihmal edilerek her iki kontrol bölgesinin gürbüz kararlılık gecikme payı değerleri hesaplanmıştır. Gürbüz kararlılık gecikme payı üzerinde bağlantı hattı güç değişimlerinin etkisi incelendiğinde, her iki kontrol bölgesi arasında farklı bağlantı hattı güç değişimleri için iki bölge YFK sisteminin

kararlılığını sürdürdüğünü ve gürbüz kararlılık gecikme payı hesabında bağlantı hattı güç değişiminin etkisinin düşük olduğu görülmüştür.

Bu çalışmanın bir sonraki aşamasında, iki bölgesi YFK sisteminin elektrikli araçlar içermesi durumunda gürbüz kararlılık gecikme payı değerleri hesaplanarak gürbüz zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizleri incelenecektir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %5

Kaynaklar

- [1] P. Kundur, Power System Stability and Control (1. Basım). McGraw-Hill Inc, New York, 1994.
- [2] H. Saadat, Power System Analysis (1. Basım). McGraw-Hill Inc, New York, 1999.
- [3] D. Muiyere, L. K. Letting, B. B. Muiyazkiwiye, Effects of communication signal delay on the power grid: a review. Electronics, 11, 874, 2022. <https://doi.org/10.3390/electronics11060874>.
- [4] L. Jiang, W. Yao, J. Y. Wen, S. J. Cheng, and Q. H. Wu, Delaydependent stability for load frequency control with constant and time varying delay. IEEE Trans. Power Syst., 2012. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2011.2172821>
- [5] Ş. Sönmez, S. Ayasun, and C. O. Nwankpa, 2016. An exact method for computing delay margin for stability of load frequency control systems with constant communication delays. IEEE Transactions on Power Systems, 31(1), 370-377, 2016. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2403865>
- [6] T. N. P. Janu, S. Nahavandi, L. V. Hien, H. Trinh and K. P. Wong,. Static output feedback frequency stabilization of time-delay power systems with coordinated electric vehicles state of charge control. IEEE Trans. Power Syst., 32(5), 3862–3874, 2017. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2633540>.
- [7] S. J. Zhou, H. B. Zeng, H. Q. Xia, Load frequency stability analysis of time-delayed multi-area power systems with evs aggregators based on bessell-legendre inequality and model reduction technique. IEEE Access, 8, 99948-99955, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2997002>.
- [8] A. Sarı, Ş. Sönmez, S. Ayasun, Y. Kabalcı, Delay-dependent stability analysis of multi-area LFC-EVs system. IEEE Transactions on Smart Grid, 14(3), 2178-2188, 2023. <https://doi.org/10.1109/TSG.2022.3212779>.
- [9] Ö Aydın, Ş. Sönmez and S. Ayasun, Stability delay margin computation of multi-area load frequency control system with electric vehicle using critical eigenvalue tracing method. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 45(5), 874-885, 2023. <https://doi.org/10.1177/01423312221122487>.
- [10] D. Katipoglu, Ş. Sönmez, S. Ayasun, A. Naveed, Impact of participation ratios on the stability delay margins computed by direct method for multiple-area load frequency control systems with demand response. Automatika, 63(1), 185-197, 2022. <https://doi.org/10.1080/00051144.2021.2020554>.
- [11] S. A. Pourmousavi and M. H. Nehrir, Introducing dynamic demand response in the LFC model. IEEE Transactions on Power Systems, 29(4), 1562-1572, 2014. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2296696>.
- [12] D. Katipoglu, Ş. Sönmez, S. Ayasun, A. Naveed, Dinamik talep cevabı içeren zaman gecikmeli iki bölgesli yük frekans kontrol sistemlerinin kararlılık bölgelerinin hesaplanması. Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, 39(1), 431-442, 2024. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.951415>.
- [13] K. E. Walton and J. E. Marshall, Direct method for TDS stability analysis. IEEE Proceeding Part D, 134, 101-107, 1987. <https://doi.org/10.1049/ip-d:19870018>.
- [14] J. Hongjie, Y. Xiaodan, A simple method for power system stability analysis with multiple time delays. IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy, Pittsburgh, USA, 2008. <https://doi.org/10.1109/PES.2008.4596157>.
- [15] J. Chen and H. A. Latchman, Frequency sweeping tests for stability independent of delay. IEEE Transactions on Automatic Control, 40 (9), 1640–1645, 1995. <https://doi.org/10.1109/9.412637>.
- [16] Z. V. Rekasius, 1980. A stability test for systems with delays. Joint Automatic Control Conference, TP9-A, 1980. <https://doi.org/10.1109/JACC.1980.4232120>.
- [17] N. Olgac and R. Sipahi, An exact method for the stability analysis of time-delayed linear time invariant (LTI) systems. IEEE Transactions on Automatic Control, 47(5), 793-797, 2002. <https://doi.org/10.1109/TAC.2002.1000275>.
- [18] L. Pekař, Q. Gao, Spectrum analysis of LTI continuous-time systems with constant delays: A literature overview of some recent results. IEEE Access, 6, 35457–35491, 2018. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2851453>.
- [19] A. Naveed, Ş. Sönmez, S. Ayasun, Impact of load sharing schemes on the stability delay margins computed by rekasius substitution method in load frequency control system with electric vehicles aggregator. International Transactions on Electrical Energy Systems, 31 (5), e12884, 2021. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12884>.
- [20] A. Naveed, Ş. Sönmez, S. Ayasun, The impact of electric vehicles aggregator with communication time delay on stability regions and stability delay margins of load frequency control system. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 9(3), 595-601, 2021. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2019.000244>.
- [21] Ş. Sonmez, S. Ayasun, Gain and phase margins-based delay margin computation of load frequency control systems using Rekasius substitution. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 41(12), 3385-3395, 2019. <https://doi.org/10.1177/0142331219826653>.
- [22] H. Gündüz, Ş. Sönmez and S. Ayasun, A comprehensive gain and phase margins based stability

- analysis of micro-grid frequency control system with constant communication time delays. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 11(3), 719-729, 2017. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.0644>.
- [23] C. A. Macana, E. Mojica-Nava and N. Quijano, Time-delay effect on load frequency control for microgrids. *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, 544-549, 2013. <https://doi.org/10.1109/ICNSC.2013.6548797>.
- [24] D. Katipoglu, Stability analysis using fractional-order p_i controller in a time-delayed single-area load frequency control system with demand response. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 23 (2), 39-46, 2023. <https://doi.org/10.4316/AECE.2023.02005>.
- [25] L. Jin, C. K. Zhang, Y. He, L. Jiang, M. Wu, Delay-dependent stability analysis of multi-area load frequency control with enhanced accuracy and computation efficiency. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34 (5), 3687-3696, 2019. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2902373>.
- [26] C. Tunç, O. Tunç, Y. Wang and J. C. Yao, Qualitative analyses of differential systems with time-varying delays via Lyapunov–Krasovskii approach. *Mathematics*, 9 (11), 1196, 2021. <https://doi.org/10.3390/math9111196>.
- [27] C. Hua, Y. Wang, Delay-dependent stability for load frequency control system via linear operator inequality. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 52(7), 6984-6992. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2020.3037113>.
- [28] H. Bevrani, *Robust power system frequency control*. Springer-Verlag, New York, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-07278-4>.
- [29] M. R. Toulabi, M. Shiroei, A. M. Ranjbar, Robust Analysis and design of power system load frequency control using the Kharitonov’s Theorem. *Int J Elect Power Energy Syst*, 55, 51–58, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.08.014>.
- [30] S. Saxena, Y. V. Hote, Decentralized PID load frequency control for perturbed multi-area power systems. *Int J Elect Power Energy Syst*, 81, 405–415, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.02.041>.
- [31] J. Sharma, Y. V. Hote, R. Prasad, PID controller design for interval load frequency control system with communication time delay. *Control Eng. Pract.*, 89, 154-168, 2019. https://doi.org/10.1016/j.conen_gprac.2019.05.016.
- [32] R. Lamba, S.K. Singla, S. Sondhi, Design of fractional order PID controller for load frequency control in perturbed two area interconnected system. *Electr. Power Compon. Syst.*, 47 (11-12), 998–1011, 2019. <https://doi.org/10.1080/15325008.2019.1660736>.
- [33] A. Naveed, Ş. Sönmez, S. Ayasun, S. Iqbal, H. Zeinoddini-Meymand, S. Kamel, Robust stability region analysis of time-delayed load frequency control systems with EVs aggregator using Kharitonov theorem”, *IET Generation, Transmission and Distribution*, 17 (19), 4386-4398, 2023. <https://doi.org/10.1049/gtd2.12983>.
- [34] V. L. Kharitonov, Asymptotic stability of an equilibrium position of a family systems of linear differential equations. *Differentsial’nye Uraveniya*, 14, 1483-1485, 1978.
- [35] T. Vyhliđal and P. Zítek, Mapping based algorithm for large-scale computation of quasi-polynomial zeros. *IEEE Transactions Automatic Control*, 2054 (1), 171-177, 2009. <https://doi.org/10.1109/TAC.2008.2008345>
- [36] Matlab (R2019b), Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2019.





Farklı akışkanlar kullanılan Karşıt Akışlı Ranque–Hilsch Vorteks Tüp sisteminin soğutma performansının makine öğrenimiyle karşılaştırılması

Machine learning comparison of cooling performance of a Counterflow Ranque–Hilsch Vortex Tube system using different fluids

Murat Korkmaz¹ , Ayhan Doğan² , Volkan Kırmacı^{3,*} 

^{1,2} Hacettepe Üniversitesi, Başkent OSB Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, 06909, Ankara Türkiye

³ Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, 74110, Bartın, Türkiye

Öz

Günümüzde ısıtma veya soğutma işlemleri yapıldığında çevreye zarar veren soğutucu akışkanlar kullanılmaktadır. Karşıt Akışlı Ranque-Hilsch Vorteks Tüpü (KARHVT) basit bir borudan oluşmaktadır. RHVT de ısıtma ve soğutma işlemi basınçlı bir akışkan yardımıyla yaparak çevreye çok az zarar vermektedir. Bu çalışmada, tüm deneylerde polyamid ve pirinç malzemelerden yapılan 2, 3, 4, 5 ve 6 orfislilik nozullar kullanılmıştır. Aynı zamanda deneyler esnasında basınçlı akışkan olarak hava ve oksijen gazları ile 1.5 bar ile 7 bar arasında her 0.5 bar değişkenlerinde veriler alınmıştır. Deneylerde alınan sonuçlar ile makine öğrenimi yöntemlerinden Destek vektör makineleri (DVM), Gauss süreç regresyonu (GSR), Lineer regresyonu (LR), Ağaç toplulukları (AT) ve Regresyon Ağaçları (RA) modelleri tahmin edilmiştir. Doğrulama işlemleri için k-fold çapraz doğrulama yöntemi ile beş katlı olarak analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda basınçlı akışkanlar oksijen ve hava, malzemelerden polyamid ve pirinç ile yapılan karşılaştırmalarda en iyi tahmin sonucunu 0,99 ile GSR metoduyla elde edilmiştir. Sonuçlar makine öğrenimi kullanılarak deney düzeneği kurulum maliyetlerinin azaltılabileceğini ve önemli zaman tasarrufu elde edilebileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Soğutma, Isıtma, Vorteks Tüp, Makine öğrenme

1 Giriş

Vorteks tüpleri 1931 yılında Ranque tarafından bulunan, 1947 yılında Hilsch tarafından geliştirilen ve basınçlı bir gaz ile aynı anda ısıtma ve soğutma işlemi yapmasından dolayı Ranque-Hilsch Vorteks Tüp (RHVT) olarak adlandırılmaya başlanmıştır [1]. Vortex tüpleri yapısal özellikleri bakımından düz yönlü akım ve karşıt akımlı olmak üzere imal edilmektedirler. Düz yönlü akımda ısıtma ve soğutma işlemi vorteks tüpündeki kontrol vanasının olduğu kısımdan yüzeye yakın çıkıştan sıcak akışkan, merkez kısmından ise soğuk akışkan olarak çıkmaktadır. Karşıt akımlı vorteks tüplerinde ise kontrol vanasının olduğu bölümden sıcak

Abstract

Today, when heating or cooling processes are carried out, environmentally harmful refrigerants are used. The Counterflow Ranque-Hilsch Vortex Tube (CFRHVT) consists of a simple tube. In RHVT, the heating and cooling process is done with the help of a pressurized fluid, causing little harm to the environment. In this study, 2, 3, 4, 5 and 6 orifice nozzles made of polyamide and brass materials were used in all experiments. At the same time, data were taken with air and oxygen gases as pressurized fluids during the experiments, and at every 0.5 bar, variables between 1.5bar and 7 bar. With the results obtained in the experiments, predictions were made with Support vector machines (SVM), Gaussian process regression (GPR), Linear regression (LR), Ensemble of Tree (ET) and Regression Trees (RT) models from machine learning methods. Five-fold analyses were performed with the k-fold cross-validation method for the validation processes as a result of the investigation. They obtained the best estimation result with the GSR method with 0.99 in the comparisons made with pressured fluids, oxygen and air, and polyamide and brass as the materials. The results show that the cost of experimental setup can be reduced and significant time savings can be achieved using machine learning.

Keywords: Cooling, Heating, Vortex Tube, Machine learning

akışkan, nozulların bağlı olduğu bölümden ise soğuk akışkan meydana gelmektedir.

RHVT ile ilgili literatürde bir çok farklı çalışma bulunmaktadır. Han ve ark. farklı soğutucu akışkanların vorteks tüpleri üzerindeki ısıtma ve soğutma performanslarını incelemişlerdir [2]. Shamsoddini ve Nezhad vorteks tüplerinde nozül sayılarının etkisi üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Çalışmaları sonucunda daha fazla nozül sayısına sahip vorteks tüpünün daha yüksek soğutma gücüne sahip olduğunu bulmuşlardır [3]. Xue ve ark. vorteks tüpte soğuk sıvı fraksiyonunu analiz etmişlerdir. Özellikle soğuk ve sıcak çıkışlar arasındaki dönen akışların eşit bölümü olarak adlandırılan soğuk sıvı fraksiyonunu

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: volkankirmaci@bartin.edu.tr (V. Kırmacı)

Geliş / Recieved: 06.06.2023 Kabul / Accepted: 16.02.2024 Yayınlanma / Published: 15.04.2021

doi: 10.28948/ngumuh.1310811

yaptıkları çalışmada optimize etmişlerdir [4]. Bej ve Sinhamahapatra, sıcak kademeli tip vorteks tüpleri üzerinde çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmada, birinci vorteks tüpünden çıkan sıcak gaz akışını, ikinci vorteks tüpü döngüsünün girişi olarak kullanılmışlardır [5]. Skye ve ark. vorteks tüpte CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) sayısal modelleriyle çalışma yapmışlardır. CFD modellerinin vorteks tüpü içindeki termal dağılımın, hız alanının net ve ayrıntılı bir şekilde etkileşimini göstermişlerdir [6].

Behera ve ark. VT (Vorteks Tüpü) deki ikincil akış üzerindeki soğuk çıkış alanının etkisini araştırmışlardır. Soğuk çıkış alanı azaldıkça ikincil akışın arttığı sonucuna varmışlardır [7]. Qyyum ve ark. VT' deki akış kontrol vanasının şeklinin ve boyutunun optimize edilmesinin, soğuk çıkış sıcaklığı açısından gelişmiş performansla sonuçlanabileceğini öne sürmüştür. Emme basıncı, geometrik varyasyonlar ve gaz keleşi biçimleri gibi çeşitli faktörleri dikkate almışlardır [8]. Lewins ve Bejan. VT de dönen akışkan tabakaları arasındaki sürtünmeli bağlantının nedeninin açılmal hız olduğunu gözlemlemişlerdir [9]. Voertks tüpünün iz yapısı Wang ve diğerleri tarafından incelenmiştir [10]. Anish ve ark. VT'nü inceleyerek viskoz kuvvetlerin yaptığı işin, VT bölümünün çevresine yakın yerlerde ısınmanın ana nedeni olduğunu bulmuşlardır [11].

Liang ve ark. giriş basıncını sırasıyla 0.3 MPa, 0.5 MPa ve 0.6 MPa'ya ayarlamışlardır. Daha sonra her giriş basıncında, sıcak uç borusunun ucunda bulunan bir kontrol vanası, farklı soğuk kütle fraksiyonlarını elde edecek şekilde belirlemişler ve soğuk kütle fraksiyonu, soğuk kütle akış hızının giriş gaz kütle akış hızına oranı olarak tanımlamışlardır [12]. Akhmetov ve Akhmetov. Ranque Hilsch vorteks tüpünün akış yapısını deneysel olarak incelemişlerdir. VT tüm hacmindeki akım çizgileri modelini, lazer Doppleranometri kullanılarak ölçülen hız dağılımlarından oluşturmuşlardır. RHVT yüksek azimut hız radyal dağılımının, teğetsel bir girişe ve tek merkeze sahip olan girdap tüpünden farklı olduğunu göstermişlerdir. Çalışmanın sonunda akışın yapısına dayanarak, sıcaklık ayırma etkisinin fiziksel mekanizmasını açıklamak için basit bir nitel model önermişlerdir [13]. Liang ve ark. Ranque-Hilsch vorteks tüpünün akustik sinyal özelliklerini inceleyerek, bunun arkasındaki enerji ayrımı olgusunu tartışmışlardır. Çalışma akışkanı olarak hava kullanılarak deneyler yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda İlginç bir şekilde, 5 nozullu vorteks tüpü, 4 nozullu ve 6 nozullu vorteks tüplerine kıyasla maksimum SPL ve COP (performans katsayısı) ürettiğini ortaya koymuşlardır. [14]. Li ve ark. VT farklı koşullar altında aksel hız profillerinin benzer modeller göstermesi özelliğine dayanarak sıcak tüp bölgesindeki aksel hız bileşeni için bir denklem geliştirmişlerdir. Aynı zamanda çalışma akışkanını sıcak ve soğuk akışkanlara ayıran ters akış sınırının hesaplama yöntemi için, bölme modeline dayalı olarak girdap tüplerinin iç akış alanı için nispeten basit bir dizi hesaplama yöntemi oluşturmuşlardır. Çalışmanın sonucunda, bir girdap tüpü içindeki akış davranışının tahmin edilmesi ve güvenilir tahminler sağlanması için uygun bir hesaplama yöntemi önermişlerdir [15].

Günümüzde deney düzeneğinin kurulum giderlerinin yüksek olması deney düzeneğinde yeterli sayıda testlerin alınmasının önemli bir zaman gerektirebilmektedir. Bu bağlamda, zamandan kazanmak ve sahada yapılan testleri en aza indirmek için günümüzde yapay zekânın bir alt dalı olan makine öğrenimi yöntemleri giderek artan bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Çalışmada, KARHVT deney sisteminde pirinç ve polyamid malzemelerinden yapılmış iki, üç, dört, beş ve altı orfisli nozullar kullanılmıştır. KARHVT'ünde 0.5 bar aralıklarla 1.50 – 7.00 bar arasında giriş basıncında oksijen gazı kullanılarak, çıkan sıcak akış sıcaklığı (T_{sck}) ile çıkan soğuk akışın sıcaklığı (T_{sgk}) arasındaki fark ($\Delta T = T_{sck} - T_{sgk}$) cinsinden performansının optimizasyonunu en doğru tahmin edebilmek amacıyla LR, DVM, GSR, AT ve RA makine öğrenimi yöntemlerinin metotları kullanılmıştır.

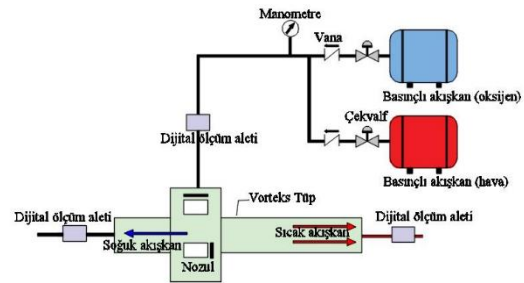
2 Materyal ve metot

Çalışmada kullanılan gövde uzunluğu 10 cm ve iç çapı 0,1 cm olan KARHVT, genişliği 55 cm, yüksekliği 33 cm ve kalınlığı 2 mm, masa üzerine Şekil 1'deki gibi yatay olarak sabitlenmiştir.



Şekil 1. KARHVT deney seti

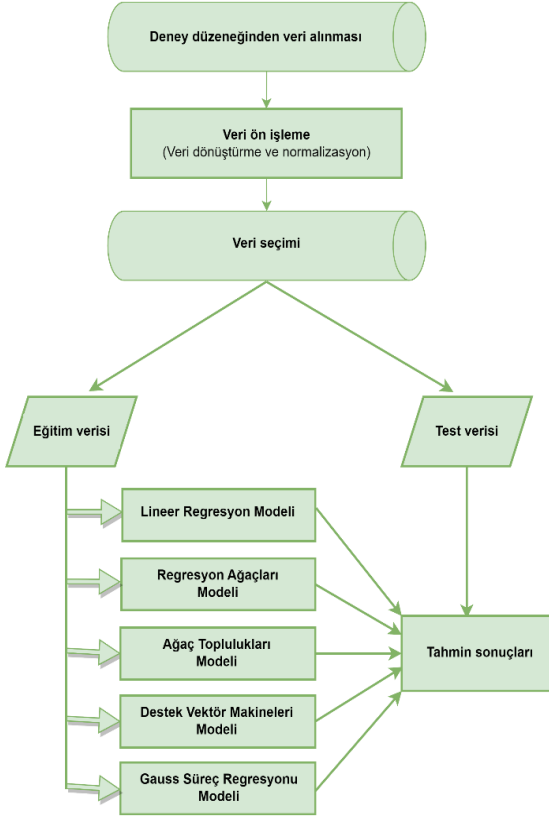
KARHVT'üne giren oksijen gazının basıncını ölçmek için %5 hassasiyetli, 0-16 bar ölçüm aralığında, kullanılabilir ortam sıcaklığının -25°C ile $+60^{\circ}\text{C}$ olduğu TSE837/1 kalite standartında olan PAKKENS tipi manometre kullanılmıştır. KARHVT çıkan sıcak ve soğuk akışın hacimsel debilerini (l/dk), sıcaklıklarını ($^{\circ}\text{C}$) %1 hassasiyet ve basınç değerlerini (kPa) %10 hassasiyetle ölçen ve hava, azot ve oksijen gazları ile kullanılan debimetre Şekil 2'deki gibi yerleştirilerek ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 2. KARHVT deney şeması

KARHVT (oksijen gazının giriş basıncını ayarlamak) girişindeki vana yardımıyla deneylerdeki başlangıç basıncı olan 1.5 bar sabitlenerek gönderilmiştir. KARHVT'nün

sıcak-soğuk akış çıkışında bulunan ölçüm cihazlarında okunan sıcaklık değerleri sabitleninceye kadar 1.5 bar basınçta oksijen gazı gönderilerek, girişteki basınç, çıkan sıcak ve soğuk akışkanın sıcaklık değerleri ile hacimsel debiler ölçülmüştür. Daha sonra sırasıyla 2 ile 7 bar basınç değerleri için yapılan deney çalışmalarında 1.5 bar basınçta yapılan işlemler bütün nozullar için tekrarlanmıştır. Deneylerin yapıldığı ortamın sıcaklığı 21°C olarak ayarlanmıştır. Deneylerin her biri üç kez tekrarlanarak ve ortalamaları alınarak deney sonuçlarının doğruluğu yapılarak çalışmada kullanılmıştır.



Şekil 3. Makine öğrenimi işlem akış şeması

KARHVT soğuk kütle oranı (μ_c) Denklem (1)'de gösterilmektedir. KARHVT'üne giren basınçlı akışkanın, tüpün çıkışındaki soğuk akışkana dönüştüğünün bulunmasını sağlayan termodinamiksel hesaplamalar Denklem (2-3)'de verilmiştir. Denklem (2)'de soğuk akış sıcaklık farkı ($\Delta T_{soğ}$), Denklem (3)'de ise sıcak akış sıcaklık farkı (ΔT_{sic}) verilmektedir. KARHVT'nin performansı ise Denklem (4)'de gösterilmiştir [16].

$$\xi = \frac{\text{soğuk akışın kütleli debisi}}{\text{giriş akışının kütleli debisi}} \quad (1)$$

$$\Delta T_{soğ} = T_{gir} - T_{soğ} \quad (2)$$

$$\Delta T_{sic} = T_{sic} - T_{gir} \quad (3)$$

$$\Delta T = T_{sic} - T_{soğ} \quad (4)$$

2.1 Makine Öğrenimi Yöntemleri

Makine öğrenimi metotları farklı sayıda verileri kendi içerisinde kullanarak eğitim modelleri oluşturmaktadırlar. Daha sonra modelleri en iyi şekilde optimize edebilmek ve uygun algoritmaları kullanarak olası en iyi tahminleri yapabilmek amacıyla büyük miktarda veriye ihtiyaç duymaktadırlar [17].

Bu çalışmada KARHVT'nün ΔT değerleri deney düzeneğinden elde edilen sonuçlar kullanılarak makine öğrenimi yöntemleriyle tahmin edilmiştir. Şekil 3'de deney düzeneği için hazırlanan makine öğrenimi işlemlerine ait akış şeması gösterilmiştir. Ayrıca analizlerde K-Fold Çapraz doğrulama yöntemi tercih edilerek makine öğrenimi metotlarının karşılaştırılması için doğruluk değerlerinin ölçüsü olan determinasyon katsayısı (R^2), kök ortalama kare hata (RMSE), ortalama kare hata (MSE), ortalama mutlak hata (MAE) değerleri hesaplanmıştır. MSE, tahmin edilen ve deneyden elde edilen sonuçlar arasındaki ortalama karesel farktır. RMSE, MSE'nin karekökü alınarak bulunur. MAE, tahmin edilen ve deneyden elde edilen sonuçlar arasındaki mutlak hataların ortalamasını verir. R^2 bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenin varyansını açıklama yüzdedir.

Bu çalışmada makine öğrenimi işlemleri için Matlab programı kullanılmıştır. Deney düzeneğinden elde edilen veriler üzerinde ön işlemler gerçekleştirilmiştir. Düzenekten Excel formatında derlenen verilerden akışkan ve nozul malzeme ismi barındıran sütunlar sayıya dönüştürülerek Matlab ortamında kullanıma hazır hale getirilmiştir. Bu veriler üzerinde standart normalizasyon uygulanmıştır. Bu işlem Z-score normalizasyonu olarak da bilinmektedir. Bu şekilde değerler ortalama sıfır ve standart sapması bir olan normal dağılıma dönüştürülür. Böylece veri ölçeklerindeki farklılıklar giderilerek verinin belirli bir aralığa sığdırılması sayesinde modelin daha iyi performans göstermesi sağlanır.

Makine öğrenimi çalışmalarında kullanılan girdi ve çıktı parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

2.1.1 Destek vektör makineleri

DVM, makine öğrenimindeki en popüler algoritmalar arasındadır ve sınıflandırma, regresyon ve aykırı değer tespiti gibi birçok sorunu çözmek için kullanılır. DVM, doğrusal ve doğrusal olmayan sınıflandırma problemleri için kullanılabilir. DVM, sınıflar arasındaki maksimum marjı sağlamak için en iyi ayrımı yapan bir hiper düzlem bulur. Bu hiperdüzlem, iki sınıf arasındaki boşluğu en büyük yapan düzlem olarak tanımlanabilir. Optimum hiperdüzleme ait Denklem (5-6)'da verilmektedir. Bu denklemlerde $x \in \mathbb{R}^N$ N-boyutlu uzayı, $y \in \{-1, +1\}$ sınıf etiketlerini, b eğilim değerini, w ağırlık vektörünü gösterir.

$$w \cdot x_i + b \geq +1, y = +1 \quad (5)$$

$$w \cdot x_i + b \leq -1, y = -1 \quad (6)$$

DVM aykırı değerlere karşı oldukça dirençlidir. DVM, özellik vektörlerinde aykırı değerleri tespit eder ve sınıflandırmayı etkilemeden bu aykırı değerleri yok sayar. DVM, sınıflandırma doğruluğunu artırmak için sınıf

ağırlıklarını ayarlayabilir ve DVM'nin hata oranını en aza indirmek için kısıtlama koşullarını optimize edebilir. Sonuç olarak, DVM, makine öğreniminde çok popüler bir algoritmadır. DVM, veri madenciliği, görüntü işleme, biyoinformatik, finans ve diğer birçok alanda kullanılmaktadır [18,19].

Tablo 1. Makine öğrenimi çalışmalarında kullanılan girdi ve çıktı parametreleri

Girdi parametreleri					Çıktı par.
Akışkan	Nozul Materyali	Nozul sayısı	Basınç (kPa)	k (W/mK)	
Hava	Pirinç		150, 200, 250, 300,		ΔT
Hava	Polyamid	2, 3, 4, 5, and 6	350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700	117, 0.257, 116, 0.250	
Oksijen	Pirinç				
Oksijen	Polyamid				

2.1.2 Ağaç toplulukları

Ağaç toplulukları, daha doğru ve daha iyi bir model oluşturmak için birden fazla karar ağacını birleştiren bir yöntemdir. Bu tekniğin temeli, zayıf öğrenenlerin güçlü bir öğrenen yaratmak için birlikte çalışabilmeleridir [20]. Torbalama, hızlandırma ve rastgele orman gibi bir AT oluşturmanın farklı yolları vardır. Bu yöntemler, bireysel ağaçları nasıl oluşturdukları ve birleştirdikleri konusunda farklılık gösterir ve her birinin kendi güçlü yönleri ve sınırlamaları vardır. AT, birçok gerçek dünya problemine ve alanına uygulanabilen güçlü ve çok yönlü bir tekniktir [21,22].

2.1.3 Gauss süreç regresyonu

Gauss Süreç Regresyonu, bazı girdi verilerine dayalı olarak bir fonksiyonun çıktısını tahmin etmek için olasılıksal bir model kullanan bir makine öğrenimi tekniğidir. GSR'nin avantajı, işlevin belirsizliğini ve değişkenliğini yakalayabilmesinin yanı sıra önceki bilgi ve bilgileri birleştirebilmesidir. GSR'nin ana zorluğu, farklı giriş noktaları arasındaki benzerliği tanımlayan ve işlevin şeklini belirleyen uygun bir çekirdek işlevi seçmektir [23]. Ayrıca optimal kernel fonksiyonu belirlenirken farklı kernel fonksiyonları denenmeli ve cross-validasyon veya test setlerinde performansları karşılaştırılmalıdır [24, 25]. Gauss süreç fonksiyonu $f(x)$ Denklem (7)'de verilmektedir.

$$f(x) = GP(m(x), k(x, x')) \quad (7)$$

Burada $m(x)$ ortalama fonksiyonu, $k(x, x')$ kovaryans fonksiyonudur. Ortalama fonksiyonu Denklem (8)'de, kovaryans fonksiyonu ise Denklem (9)'da verilmektedir.

$$m(x) = E[f(x)] \quad (8)$$

$$k(x, x') = E[(f(x) - m(x))(f(x') - m(x')))] \quad (9)$$

2.1.4 Lineer regresyon

LR, bağımlı ve bağımsız değişken veya değişkenler arasında doğrusal bir korelasyon olduğu varsayımına dayanır. LR, gelecekteki değerleri tahmin etmek, hipotezleri test etmek veya nedensel etkileri tahmin etmek gibi çeşitli amaçlar için kullanılabilir [26]. Doğrusal regresyon, veri analizi için yaygın olarak kullanılan ve güçlü bir araçtır, ancak aynı zamanda bazı sınırlamaları ve zorlukları vardır. Bunlardan biri, bağımsız değişkenlerden bazıları birbiriyle yüksek oranda ilişkili olduğunda ortaya çıkan çoklu bağlantıdır. Bu, eğimleri ve standart hatalarını tahmin etmede sorunlara neden olabilir ve yanıltıcı veya yanlış sonuçlara yol açabilir. Başka bir zorluk, x' 'in farklı değerleri arasında hata teriminin varyansı sabit olmadığında ortaya çıkan değişen varyanstır. Bu, doğrusal regresyonun varsayımlarından birini ihlal edebilir ve hipotez testlerinin ve güven aralıklarının geçerliliğini etkileyebilir.

LR yönteminde tek bir bağımsız değişken kullanılabilir gibi birden çok bağımsız değişken de kullanılabilir. Birden çok bağımsız değişken kullanıldığında çoklu lineer regresyon (ÇLR) adını alır. ÇLR yöntemine ait eşitlik Denklem (10)'da verilmektedir.

$$y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n + \varepsilon \quad (10)$$

Denklem (10)'da birden çok regresyon katsayısı (a_1, a_2, \dots, a_n) ve birden çok bağımsız değişken (X_1, X_2, \dots, X_n) bulunmaktadır.

2.1.5 Regresyon ağaçları

Bir regresyon ağacı, bir özelliğin değeri veya hedef değişkenin ortalaması gibi belirli kriterlere dayalı olarak verileri giderek daha küçük alt kümelere bölerek çalışır. Her alt küme, ağaçtaki bir düğümlerle temsil edilir ve her bir bölme, bir dalla temsil edilir. Ağacın altındaki son düğümlere yapraklar denir ve o alt kümedeki veri noktalarının ortalamasına dayalı olarak hedef değişken için tahmin edilen değeri içerirler. Bir regresyon ağacı, CART (Sınıflandırma ve Regresyon Ağaçları), CHAID (Ki-kare Otomatik Etkileşim Tespiti) veya MARS (Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Çizgileri) [27, 28] gibi çeşitli algoritmalar kullanılarak oluşturulabilir.

3 Bulgular ve tartışma

RHVT ile akışkan olarak hava ve oksijen, malzeme olarak pirinç ve polyamid kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Tüm deneyler 2, 3, 4, 5 ve 6 orfislilik nozul kullanılarak ayrı ayrı tekrarlanmıştır. Bu deneylerin sonuçları ile makine öğrenimi eğitimleri ve testleri yapılmıştır. Doğrulama işlemleri k-fold çapraz doğrulama yöntemi ile beş katlı olarak gerçekleştirilmiştir. Makine öğrenimi metodlarının doğruluk değerleri performans metrikleri (R^2 , RMSE, MSE, MAE) incelenerek bulunmuştur.

Hava ve pirinç kullanılarak gerçekleştirilen makine öğrenimine ait sonuç grafikleri Şekil 4'de, performans metrikleri tablosu ise Tablo 2'de verilmektedir. Bu sonuçlar incelendiğinde en iyi sonuçların DVM ve GSR yöntemlerine

ait olduğu görülmektedir. Bunları sırasıyla LR, AT ve RA yöntemleri izlemektedir

Tablo 2. Hava ve pirinç kullanılarak gerçekleştirilen makine öğrenimi performans metrikleri

	LR	DVM	GSR	RA	AT
R ²	0.90	0.99	0.99	0.83	0.88
RMSE	5.07	1.55	1.28	6.48	5.42
MSE	25.67	2.39	1.63	41.97	29.40
MAE	4.29	1.20	0.80	5.29	4.36

Hava ve polyamid kullanılarak gerçekleştirilen makine öğrenimine ait sonuç grafikleri Şekil 5'te, performans metrikleri tablosu Tablo 3'te verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde en iyi sonuçların GSR yöntemine ait olduğu görülmektedir. Onu sırasıyla DVM, AT, LR ve RA yöntemleri izlemektedir.

Tablo 3. Hava ve polyamid kullanılarak gerçekleştirilen makine öğrenimi performans metrikleri

	LR	DVM	GSR	RA	AT
R ²	0.78	0.92	0.99	0.72	0.86
RMSE	5.61	3.45	1.04	6.43	4.46
MSE	31.44	11.91	1.08	41.39	19.91
MAE	4.63	2.65	0.73	5.63	3.80

Oksijen ve pirinç kullanılarak gerçekleştirilen makine öğrenimine ait sonuç grafikleri Şekil 6'da, performans metrikleri tablosu Tablo 4'te verilmektedir. Bu sonuçlara göre en iyi performansı DVM ve GSR yöntemleri göstermektedir. Bunları sırasıyla LR, AT ve RA yöntemleri izlemektedir.

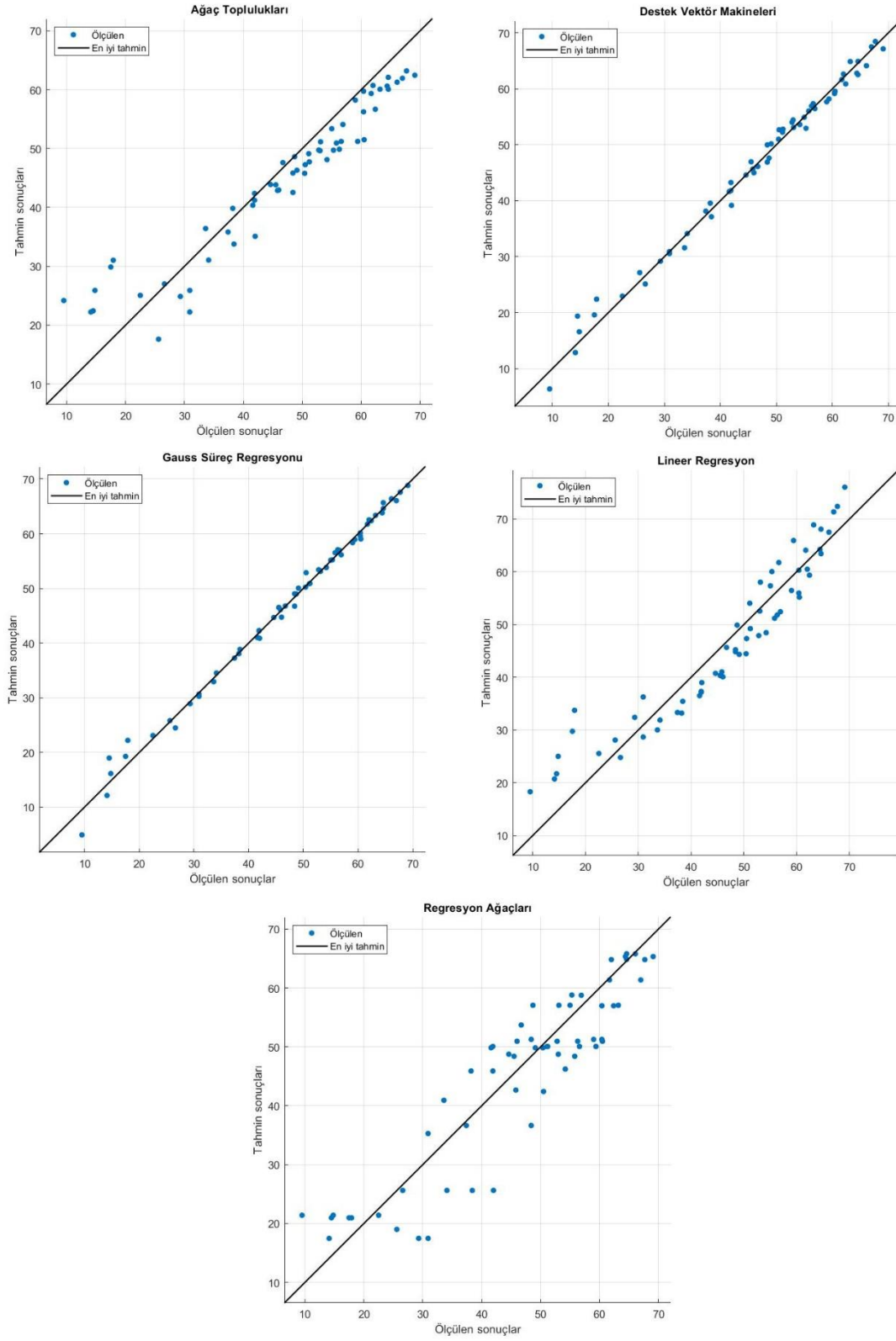
Tablo 4. Oksijen ve pirinç kullanılarak gerçekleştirilen makine öğrenimi performans metrikleri

	LR	DVM	GSR	RA	AT
R ²	0.95	0.99	0.99	0.86	0.91
RMSE	3.70	1.25	0.73	6.01	4.79
MSE	13.68	1.57	0.53	36.14	22.97
MAE	3.05	1.03	0.56	4.95	3.99

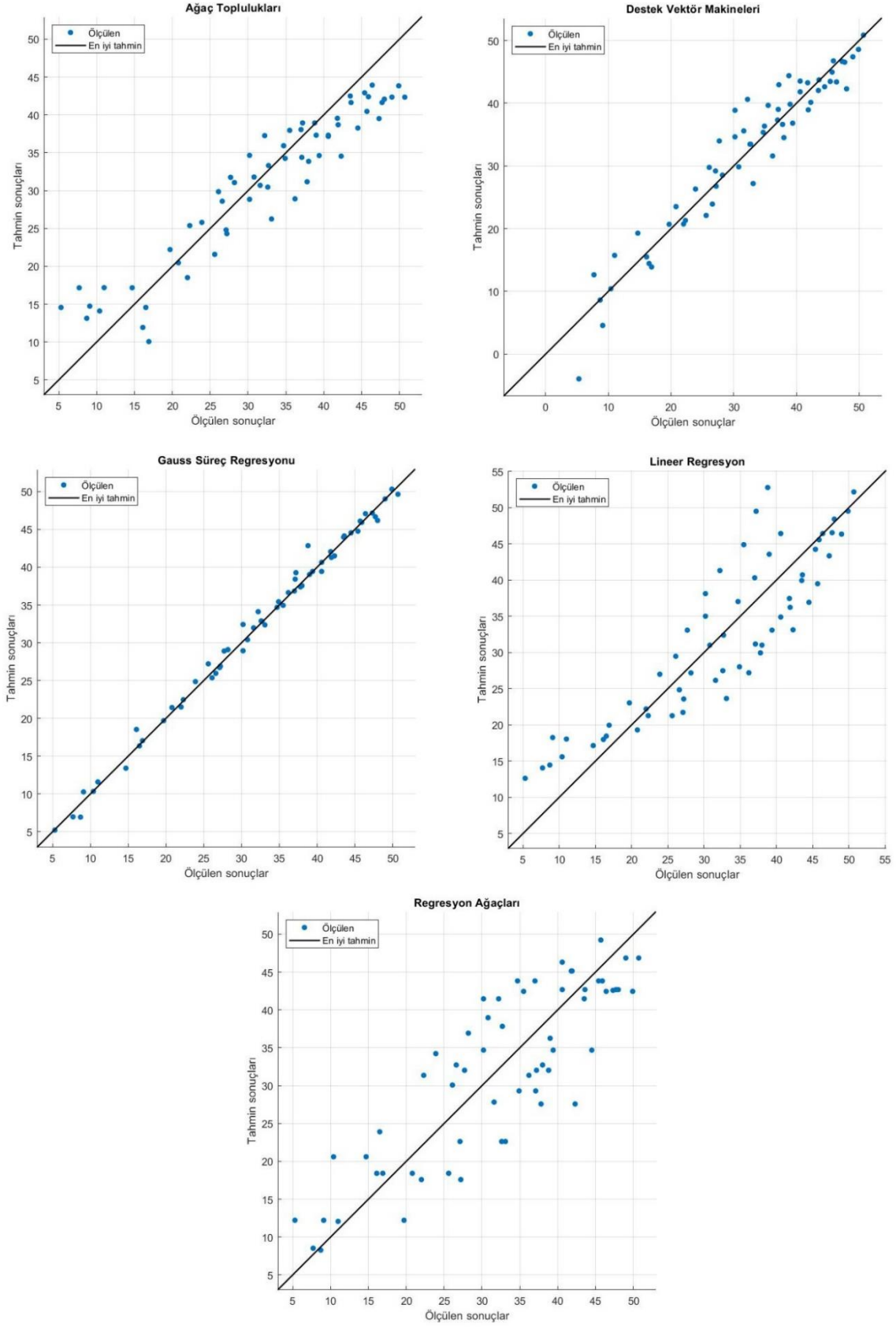
Oksijen ve polyamid kullanılarak gerçekleştirilen makine öğrenimine ait sonuç grafikleri Şekil 7'de, performans metrikleri tablosu Tablo 5'te verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde en iyi sonucun GSR yöntemine ait olduğu, ona çok yakın değerlerle DVM yönteminin izlediği görülmektedir. Bunları sırasıyla LR, AT ve RA yöntemleri izlemektedir.

Tablo 5. Oksijen ve polyamid kullanılarak gerçekleştirilen makine öğrenimi performans metrikleri

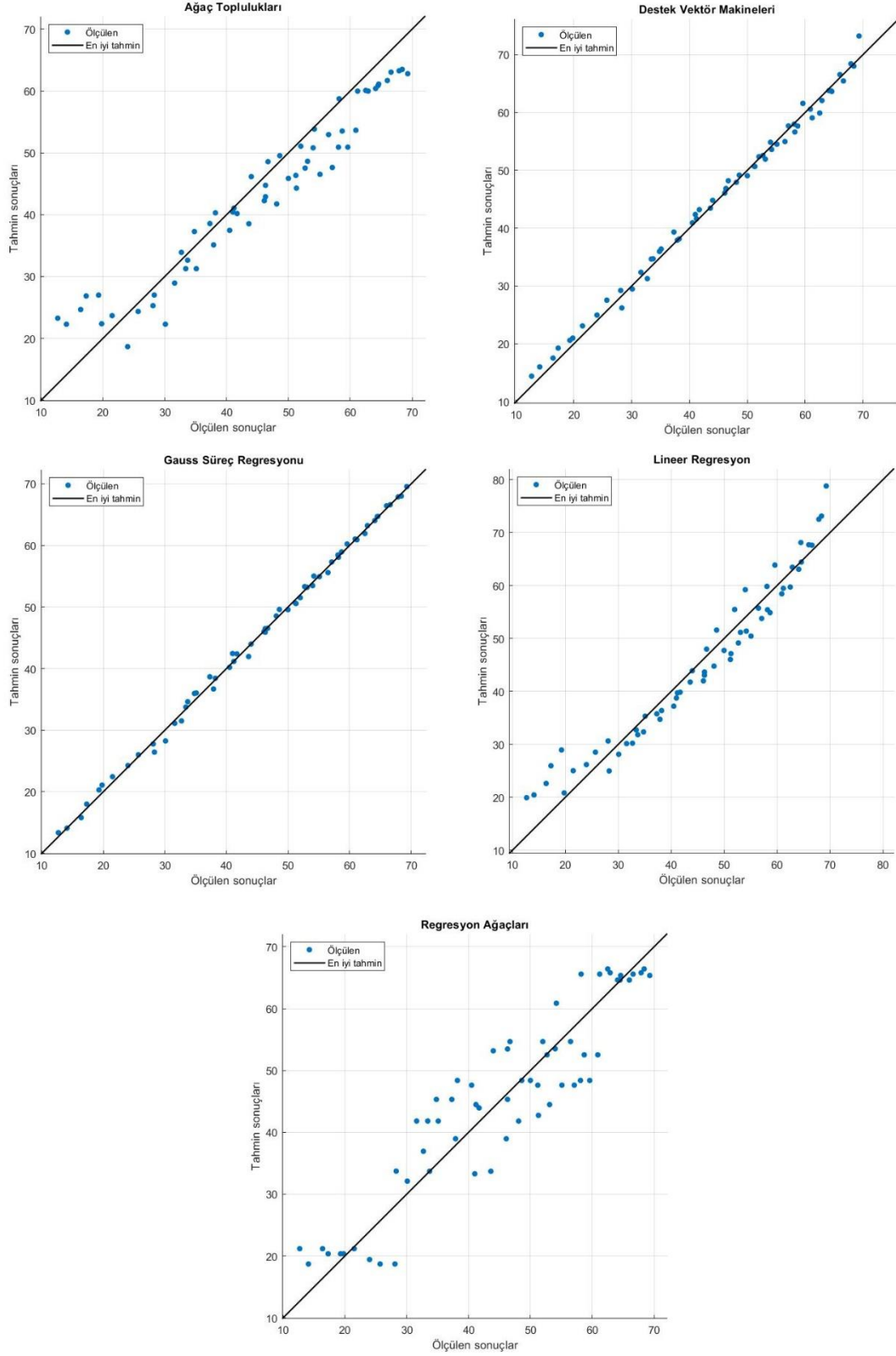
	LR	DVM	GSR	RA	AT
R ²	0.95	0.98	0.99	0.87	0.94
RMSE	3.07	2.08	1.11	4.84	3.45
MSE	9.44	4.34	1.24	23.39	11.91
MAE	2.48	1.66	0.77	4.10	2.77



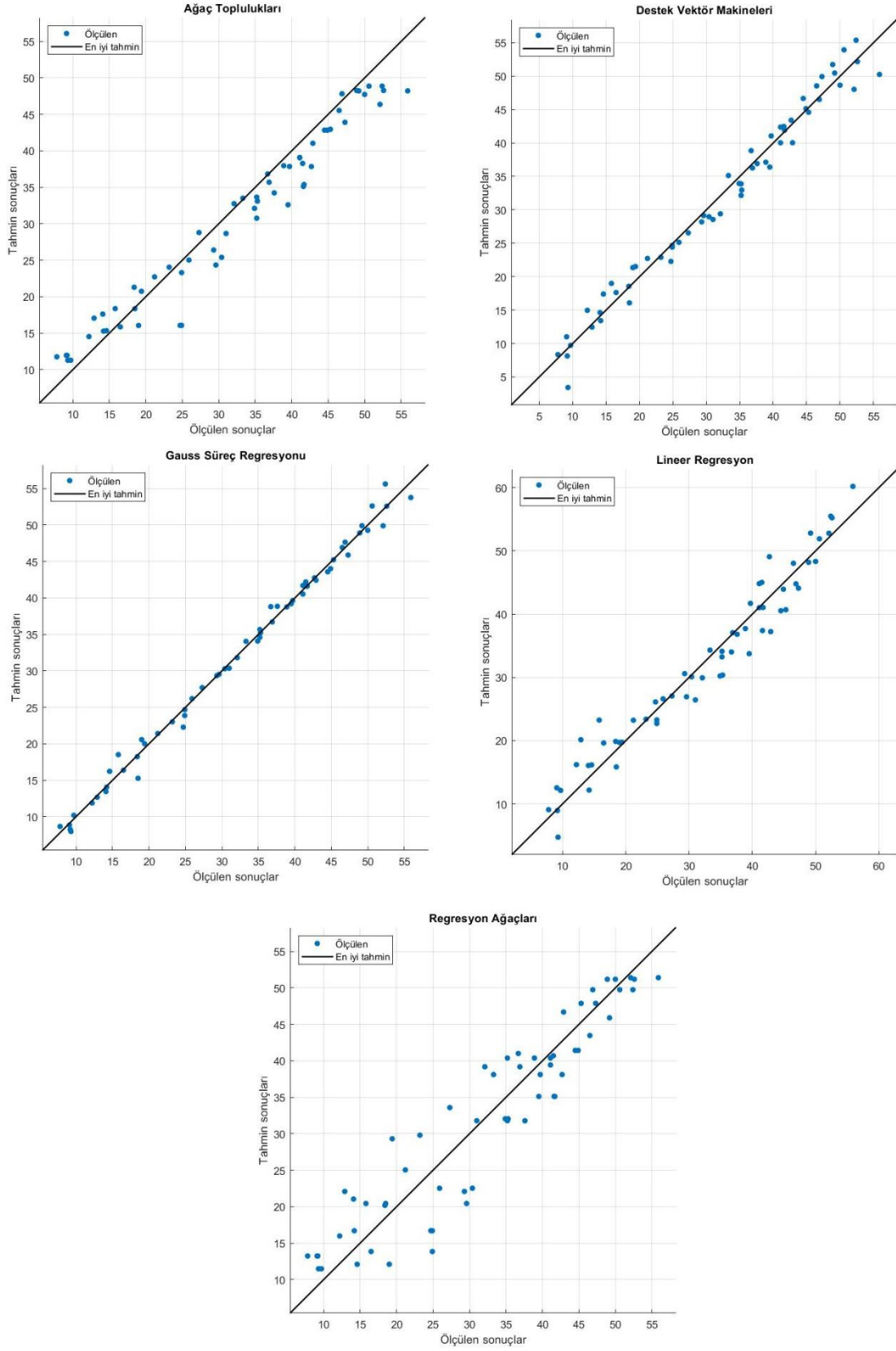
Şekil 4. Hava ve pirinç kullanılarak gerçekleştirilen makine öğrenimine ait sonuç grafikleri



Şekil 5. Hava ve polyamid kullanılarak gerçekleştirilen makine öğrenimine ait sonuç grafikleri



Şekil 6. Oksijen ve pirinç kullanılarak gerçekleştirilen makine öğrenimine ait sonuç grafikleri



Şekil 7. Oksijen ve polyamid kullanılarak gerçekleştirilen makine öğrenimine ait sonuç grafikleri

4 Sonuçlar

Tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde GSR yönteminin tüm çalışmalarda en başarılı yöntem olduğu, ona en yakın sonuçların ise DVM yöntemiyle elde edilebildiği görülmektedir. Diğer makine öğrenimi yöntemleri kullanılan akışkan ve malzemeye göre farklılık gösterse de en düşük başarı RA yönteminde elde edilmiştir. Bununla birlikte tüm yöntemler tüm çalışmalarda %70'in üzerinde başarı göstermişlerdir. Kullanılan akışkanlarla yapılan tüm çalışmalar birlikte karşılaştırıldığında GSR yöntemi haricinde oksijen kullanılarak yapılan çalışmaların başarılarının hava kullanılanlardan daha yüksek olduğu söylenebilir. GSR yöntemi tüm çalışmalarda akışkana bağlı olmaksızın yüksek başarı göstermiştir. Bu çalışmada akışkan olarak hava ve oksijen kullanılmıştır. Bu akışkanlarla elde edilen sonuçlar incelendiğinde pirinç ve polyamid malzemeler için sonuçlarda belirgin bir farklılık görülmemiştir. Tüm sonuçlar bu çalışmada kullanılan makine öğrenimi metodlarının RHVT ile yapılacak deney sonuçlarını yüksek başarıyla tahmin edebileceğini ve benzer koşullarda deney yapmaya gerek kalmaksızın kullanılabileceğini göstermektedir. Makine öğrenimi kullanarak deney düzeneği kurulum maliyetlerinin azaltılabileceği, zaman tasarrufu elde edilebileceği ve araştırma çeşitliliği ile literatüre katkı sağlayabileceği görülmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %16

Kaynaklar

- [1] M. Korkmaz, A. Dogan, and V. Kırmacı, Performance Analysis of Counterflow Ranque – Hilsch Vortex Tube with Linear Regression, Support Vector Machines and Gaussian Process Regression Method, Gazi J. Eng. Sci., vol. 8, no. 2, pp. 361–370, 2022. <https://doi.org/10.30855/gmbd.0705015>.
- [2] X. Han et al., The influence of working gas characteristics on energy separation of vortex tube, Appl. Therm. Eng., vol. 61, no. 2, pp. 171–177, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.07.027>.
- [3] R. Shamsoddini and A. H. Nezhad, Numerical analysis of the effects of nozzles number on the flow and power of cooling of a vortex tube, Int. J. Refrig., vol. 33, no. 4, pp. 774–782, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2009.12.029>.
- [4] Y. Xue, M. Arjomandi, and R. Kelso, The working principle of a vortex tube, Int. J. Refrig., vol. 36, no. 6, pp. 1730–1740, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.04.016>.
- [5] N. Bej and K. P. Sinhamahapatra, Exergy analysis of a hot cascade type Ranque-Hilsch vortex tube using turbulence model, Energy Econ., vol. 45, no. 1947, pp. 13–24, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.05.020>.
- [6] H. M. Skye, G. F. Nellis, and S. A. Klein, Comparison of CFD analysis to empirical data in a commercial vortex tube, Int. J. Refrig., vol. 29, no. 1, pp. 71–80, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2005.05.004>.
- [7] U. Behera et al., CFD analysis and experimental investigations towards optimizing the parameters of Ranque-Hilsch vortex tube, Int. J. Heat Mass Transf., vol. 48, no. 10, pp. 1961–1973, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2004.12.046>.
- [8] M. A. Qyyum, A. A. Noon, F. Wei, and M. Lee, Vortex tube shape optimization for hot control valves through computational fluid dynamics, Int. J. Refrig., vol. 102, pp. 151–158, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.02.014>.
- [9] J. Lewins and A. Bejan, Vortex tube optimization theory, Energy, vol. 24, no. 11, pp. 931–943, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(99\)00039-0](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(99)00039-0).
- [10] W. Wang, C. Wang, Y. Wei, and W. Song, A study on the wake structure of the double vortex tubes in a ventilated supercavity, J. Mech. Sci. Technol., vol. 32, no. 4, pp. 1601–1611, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0315-5>.
- [11] S. Anish, T. Setoguchi, and H. D. Kim, Computational investigation of the temperature separation in vortex chamber, J. Mech. Sci. Technol., vol. 28, no. 6, pp. 2369–2376, 2014. <https://doi.org/10.1007/s12206-014-0529-0>.
- [12] F. Liang, H. Wang, and X. Wu, Study on energy separation characteristics inside the vortex tube at high operating pressure, Therm. Sci. Eng. Prog., vol. 14, no. September, p. 100432, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100432>.
- [13] D. G. Akhmetov and T. D. Akhmetov, Flow structure and mechanism of heat transfer in a Ranque–Hilsch vortex tube, Exp. Therm. Fluid Sci., vol. 113, no. December 2019, p. 110024, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.110024>.
- [14] F. Liang, C. Xu, G. Tang, J. Wang, Z. Wang, and N. Li, Experimental investigation on the acoustic characteristics and cooling performance of the vortex tube, Int. J. Refrig., vol. 131, no. August, pp. 535–546, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.08.001>.
- [15] N. Li, G. Jiang, N. Gao, and G. Chen, Simple model for flow field division and flow structure calculation in a vortex tube, Int. J. Refrig., vol. 139, no. October 2021, pp. 48–59, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.04.002>.
- [16] V. Kırmacı, Paralel bağlı karşıt akışlı ranque-hilsch vorteks tüp sisteminde farklı çalışma akışkanı ve nozul malzemesi kullanımının performans etkisinin deneysel incelenmesi, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknol. Derg., vol. 8, no. 1, pp. 1204–1215, 2020. <https://doi.org/10.29130/dubited.658242>
- [17] J. Wei et al., Machine learning in materials science, InfoMat, vol. 1, no. 3, pp. 338–358, 2019. <https://doi.org/10.1002/inf2.12028>
- [18] F. Zhu et al., Biomedical text mining and its applications in cancer research, J. Biomed. Inform., vol. 46, no. 2, pp. 200–211, 2013. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2013.05.004>

- [.org/10.1016/j.jbi.2012.10.007](https://doi.org/10.1016/j.jbi.2012.10.007).
- [19] X. Zhou et al., Comparison of different machine learning algorithms for predicting air-conditioning operating behavior in open-plan offices, *Energy Build.*, vol. 251, p. 111347, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111347>.
- [20] V. A. Dev and M. R. Eden, Formation lithology classification using scalable gradient boosted decision trees, *Comput. Chem. Eng.*, vol. 128, pp. 392–404, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.06.001>.
- [21] X. Chen, M. Zahiri, and S. Zhang, Understanding ridesplitting behavior of on-demand ride services: An ensemble learning approach, *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 76, pp. 51–70, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.12.018>.
- [22] I. Priyadarshini, S. Sahu, R. Kumar, and D. Taniar, A machine-learning ensemble model for predicting energy consumption in smart homes, *Internet of Things*, vol. 20, p. 100636, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2022.100636>.
- [23] M. Sharifzadeh, A. Sikinioti-Lock, and N. Shah, Machine-learning methods for integrated renewable power generation: A comparative study of artificial neural networks, support vector regression, and Gaussian Process Regression, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 108, pp. 513–538, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.040>.
- [24] Z.-L. Ouyang, Z.-J. Zou, and L. Zou, Adaptive hybrid-kernel function based Gaussian process regression for nonparametric modeling of ship maneuvering motion, *Ocean Eng.*, vol. 268, p. 113373, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113373>.
- [25] M. Pal and S. Deswal, Modelling pile capacity using Gaussian process regression, *Comput. Geotech.*, vol. 37, no. 7, pp. 942–947, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.07.012>.
- [26] Q.-H. Luu, M. F. Lau, S. P. H. Ng, and T. Y. Chen, Testing multiple linear regression systems with metamorphic testing, *J. Syst. Softw.*, vol. 182, p. 111062, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2021.111062>.
- [27] V. Rodriguez-Galiano, M. Sanchez-Castillo, M. Chica-Olmo, and M. Chica-Rivas, Machine learning predictive models for mineral prospectivity: An evaluation of neural networks, random forest, regression trees and support vector machines, *Ore Geol. Rev.*, vol. 71, pp. 804–818, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.01.001>.
- [28] T.-S. Lee, C.-C. Chiu, Y.-C. Chou, and C.-J. Lu, Mining the customer credit using classification and regression tree and multivariate adaptive regression splines, *Comput. Stat. Data Anal.*, vol. 50, no. 4, pp. 1113–1130, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.csda.2004.11.006>.





Kablosuz güç transferi sistemi için Q faktörü etkisinin analizi

Analysis of Q factor effect for wireless power transfer system

Emrah Aslan^{1,*} , Yıldırım Özüpak² 

^{1,2} Dicle Üniversitesi, Silvan Meslek Yüksekokulu, 21000, Diyarbakır, Türkiye

Öz

Elektrikli Araçların (EA) kablosuz olarak şarj edilmesi için en uygun yöntem, enerjiyi yakın alanda aktaran manyetik rezonans kuplajıdır. Bu çalışmada, kalite faktörünün bir EA'nın kablosuz şarj sistemi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. 85 kHz frekans, 20 kW güç ve 150 mm bobinler arası mesafe belirlendikten sonra kalite faktörüne göre Kablosuz Güç Aktarımı (KGA) sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kalite faktörünün verime, kritik hava aralığına ve kapasitörlerdeki gerilime etki ettiği görülmüştür. Kalite faktörü arttıkça kritik hava boşluğu da artar ve daha uzun mesafelere iletim verimli bir şekilde gerçekleştirilebilir. Ancak bu faktörün artmasına bağlı olarak kapasitörler üzerindeki gerilim stresi de artar. Çalışmada kalite faktörüne göre kritik hava boşluğu belirlenmiştir. Yüksek kalite faktörü, yüksek hava boşluklarında verimliliği arttırsa da hava boşluklarının yakın olduğu uygulamalarda verimliliği düşürmektedir. Aslında endüktansı artırarak kalite faktörünü arttırmak iç direncin artması anlamına gelir ve bu durumun maksimum verimliliği azalttığı görülmüştür. Bu çalışmada Q faktörünün iletim gücü ve iletim verimliliği üzerindeki etkileri deneysel ve benzetim aracılığıyla araştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: KGA, Q faktörü, Verimlilik, EA

1 Giriş

Elektrikli araç şarj sistemlerinin gelişimi ve çeşitliliği gerçekten önemli bir konu. Kablosuz Güç Aktarımı (KGA) sistemleri, elektrikli araçların şarj edilmesi için kablosuz iletimi kullanarak birçok avantaj sunar. KGA'nın kablo karmaşasını ortadan kaldırması, şarj işlemi daha kullanıcı dostu hale getirir. Ayrıca, bu sistemler elektrikli araçlar dışında farklı alanlarda da kullanılıyor, özellikle biyomedikal cihazlar, cep telefonları ve insansız hava araçları gibi mobil cihazların kablosuz şarjı için de büyük bir potansiyele sahiptir. Yüksek enerji verimliliği ve düşük karbon ayak izi, elektrikli araçların sürdürülebilirliğini arttırmak için önemli hedeflerdir. Bu bağlamda, kablosuz şarj sistemleri, kullanıcıların elektrikli araçlarını daha kolay ve verimli bir şekilde şarj etmelerine yardımcı olabilir. Elektrik motorları, elektromanyetik alanlar ve kablosuz güç transferi gibi konular arasındaki etkileşimi incelemek, bu alanda önemli bir katkı sağlayabilir [1-3]. Elektrikli aracın aküsü kablolu ve kablosuz olmak üzere iki şekilde şarj edilebilmektedir. KGA sistemleri, şarj sistemini kablolu

Abstract

The most suitable method for wireless charging of Electric Vehicles (EVs) is magnetic resonance coupling, which transfers energy in the near field. In this study, the effect of quality factor on the wireless charging system of an EV is investigated. After determining 85 kHz frequency, 20 kW power and 150 mm inter-coil distance, the Wireless Power Transfer (WPT) system design was realized according to the quality factor. It was observed that the quality factor affects the efficiency, critical air gap and voltage on capacitors. As the quality factor increases, the critical air gap increases and longer distances can be transmitted efficiently. However, as this factor increases, the voltage stress on the capacitors also increases. In the study, the critical air gap was determined according to the quality factor. Although high quality factor increases efficiency at high air gaps, it decreases efficiency in applications where air gaps are close. In fact, increasing the quality factor by increasing the inductance means increasing the internal resistance and this has been found to reduce the maximum efficiency. In this study, the effects of Q factor on transmission power and transmission efficiency are investigated experimentally and through simulation.

Keywords: WPT, Q factor, Efficiency, EV

şarjın neden olduğu kablo karmaşasından kurtarır. Ayrıca kablolu şarja göre daha güvenilir ve pratik bir çözüm sunuyor. KGA sistemleri elektrikli araçların dışında biyomedikal cihazlar, cep telefonları ve insansız hava araçları gibi birçok farklı alanda da kullanılmaktadır [4,5].

KGA ile enerji aktarımı, mikrodalga, kapasitif bağlantı ve endüktif bağlantı gibi birçok yolla sağlanabilir. Yöntemler uygulama alanlarına göre değişmektedir. Elektrikli araçlar için kablosuz şarjın amacı, yakın alanda yüksek gücün verimli bir şekilde aktarılmasıdır. Bu uygulamalar için en uygun yöntem manyetik rezonans kuplajıdır [6].

Manyetik rezonans kuplajı kullanan KGA teknolojisi, fiziksel elektrik bağlantıları olmadan iki bobin arasındaki manyetik bağlantı yoluyla güç aktarımına olanak tanır. Klasik indüksiyon yönteminden farklı olarak verici ve alıcı bobinlere kapasitörler bağlanır. Bu kapasitörler alıcı ve verici sisteminde kompanzasyon sağlar ve böylece enerji verimli bir şekilde aktarılır [7]. Tam telafiyi sağlamak için KGA sisteminin rezonans frekansında çalışması gerekir.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: emrah.aslan@dicle.edu.tr (E. Aslan)

Geliş / Received: 06.01.2024 Kabul / Accepted: 17.02.2024 Yayınlanma / Published: 15.04.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1415695

Verimin her koşulda yüksek olması için rezonans frekansının takip edilmesi önemlidir. Ayrıca uygulamalarda rezonans frekansının sabit kalması isteniyorsa kapasitörlerin değeri değiştirilerek rezonans sağlanabilir [8]. Kondansatörlerin bobinlere bağlanma şekline göre çeşitli topolojiler bulunmaktadır. Seri-Seri (SS) topolojisi en verimli ve basit KGA topolojisi olup geniş bir yük aralığında çalışabilmektedir [9].

Manyetik rezonans kuplajı sisteminde enerjinin verimli iletimi, çalışma frekansına, bobin boyutuna, bobinler arasındaki mesafeye ve bobinlerin hizalanmasına bağlıdır [10]. Bobinler arasındaki mesafenin artırılması veya yanlış hizalama, bağlantı faktörünü azaltır ve verimin düşmesine neden olabilir. Alıcı ve vericinin birbirlerine göre konumunun tahmin edilmesi ve hizalamanın sağlanması önemlidir [11]. Frekansın veya bobin boyutunun artırılması, KGA'nın daha yüksek hava boşluklarında ve yanlış hizalamada bile verimli olmasını sağlar [12,13]. Ancak frekansın artırılması cilt ve yakınlık etkisinden dolayı kayıpları da arttırabilmektedir. Bu nedenle Litz teli yüksek frekans uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir [14]. KGA'da koaksiyel kablo yapılarının kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır. Yüksek kaliteli faktör koaksiyel rezonatör yapısı ile KGA'da yüksek verim elde edilmiştir [15]. KGA uygulamalarında maksimum enerji transferini gerçekleştirmek için birleştirme katsayısı, kalite faktörü ve frekans en önemli parametrelerdir.

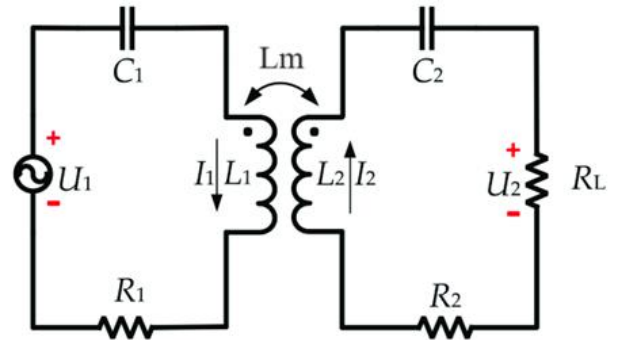
WPT (Kablosuz Güç Aktarımı) sisteminde Q faktörü, rezonans bobinlerinin etkinliğini belirlemek için kullanılan önemli bir parametredir. Önemli parametreleri avantajları arasında yüksek verimlilik, daha uzun menzil, daha az elektromanyetik parazit ve rezonansın daha keskin olmasını sağlar, bu da diğer elektromanyetik parazitlerin sistemi etkileme olasılığını azaltır. Yüksek Q faktörüne sahip bobinler, rezonans frekansına daha hassas hale gelir. Bu, dış etkenlerden (örneğin, ortam sıcaklığı veya bobinler arasındaki mesafe) daha fazla etkilenmelerine neden olabilir ve istenmeyen performans değişikliklerine yol açabilir. Maliyet Yüksek Q faktörüne sahip bobinlerin üretimi genellikle daha maliyetlidir. Daha hassas malzemelerin kullanılması veya daha karmaşık üretim süreçlerinin gerekliliği, maliyeti artırabilir. Boyut ve Ağırlık, Yüksek Q faktörüne sahip bobinler genellikle daha büyük boyutlarda olabilir veya daha fazla malzeme gerektirebilir. Bu durum, özellikle taşınabilir uygulamalarda önemli olabilir, çünkü daha büyük boyutlar veya ağırlık, cihazın taşınabilirliğini veya montaj esnekliğini azaltabilir. Genel olarak, yüksek Q faktörü, kablosuz güç aktarım sistemlerinin verimliliğini artırırken, bazı hassasiyet ve maliyet dezavantajlarına yol açabilir. Bu nedenle, tasarım sürecinde dikkatlice dengelemek önemlidir.

Bu çalışmada, kalite faktörünün bir EA'nın kablosuz şarj sistemi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. KGA için optimal parametreler belirlendikten sonra kalite faktörünün verimliliği, kritik hava aralığını ve kapasitörler üzerindeki gerilim stresini etkilediği gösterilmiştir. Kalite faktörünün artırılması, kritik hava boşluğunu iyileştirerek daha uzun mesafelerde daha verimli iletim sağlar. Ancak aynı zamanda kapasitörlerdeki gerilim stresini de artırır. Bu nedenle kalite

faktörünün seçimi, özel uygulama gerekliliklerine bağlı olarak dikkatle değerlendirilmelidir. Bu çalışmada Ansys Maxwell-3D kullanılarak devre modeli, bobin tasarımı ve manyetik analiz yapılmıştır. Bu çalışmanın katkıları, batarya tabanlı bir elektrikli aracın 20 kW kapasite ile şarj edilmesini sağlayan bir alıcı-verici tasarımı, geliştirilen KGA sisteminin batarya şarj koşuluna uygun optimal kompanzasyon topolojisinin seçimi, kompanzasyon topolojisinin optimal tasarım yönteminin oluşturulması ve deneysel olarak doğrulanmasıdır.

2 Materyal ve metot

Manyetik indüksiyonlu KGA sistemlerinde enerji, bobinler kullanılarak manyetik bağlantıyla aktarılır. Alıcı ve verici bobin arasındaki karşılıklı endüktans verimliliği doğrudan etkiler. Güçlü bir bağlantı olduğunda verimlilik yüksek olma eğilimindedir. Öte yandan, daha düşük bağlantı genellikle daha düşük verimlilikle sonuçlanır. Bu yapının daha düşük kuplaj faktöründe çalışması için manyetik rezonans kuplajlı KGA sistemleri kullanılmaktadır. Rezonans, bobinlere seri veya paralel bağlanan kapasitörler tarafından sağlanır. SS topolojisi, KGA uygulamalarında sıklıkla kullanılan, basit ve etkili bir yapılandırma. SS topolojisini kullanan KGA devresi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. SS topolojisini kullanan KGA sisteminin eşdeğer devresi

burada R_1 ve R_2 sırasıyla verici ve alıcı sistemlerin iç direncidir. V_1 giriş gerilimi, I_1 giriş akımı ve I_2 çıkış akımıdır. L_1 ve L_2 sırasıyla verici ve alıcı bobinlerin endüktanslarıdır. L_m karşılıklı endüktanstır ve R_L yük empedansdır. C_1 ve C_2 sırasıyla verici ve alıcının kapasitanslarıdır. Rezonatörün doğal açılma frekansı Denklem (1)'de gösterilmiş, kalite faktörü ise Denklem (2)'de verilmiştir.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (1)$$

$$Q = \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{1}{R} = \frac{L\omega_0}{R} \quad (2)$$

L , R , Q ve C sırasıyla rezonatörün endüktansı, iç direnci, kalite faktörü ve kapasitansdır. ω_0 doğal açılma frekansıdır. Verici ve alıcı bobini arasındaki karşılıklı endüktans,

bağlantı faktörüne ve verici ile alıcının öz endüktansına bağlıdır. Karşılıklı endüktans **Denklem (3)**'te verilmiştir.

$$L_m = k\sqrt{L_1L_2} \quad (3)$$

Bu denklemde k birleştirme katsayısıdır. SS topolojisi için eşdeğer empedans ve verimlilik sırasıyla **Denklem (4)** ve **(5)**'te verilmiştir [16].

$$Z_{Eq} = R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{L_m^2 \omega^2}{j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + Z_0 + R_2} \quad (4)$$

$$\eta = \left(\frac{j\omega L_m}{j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + R_L + R_2} \right)^2 \times \frac{R_L}{Z_{Eq}} \quad (5)$$

KGA sisteminde karşılıklı endüktans kritik ortak endüktansa kadar azalsa bile verim değişmez. Kritik karşılıklı endüktansın altına düştükten sonra verim hızla düşmeye başlar. Kritik karşılıklı endüktans, doğal açılal frekansa, yük empedansına ve iç dirence bağlıdır. Kritik karşılıklı endüktans **Denklem (6)** ile hesaplanır. **Denklem (7)**'de olduğu gibi L_m kritik ortak endüktansın altındaysa KGA sisteminin verimliliği düşer. **Denklem (8)**'de olduğu gibi, L_m kritik karşılıklı endüktansın üzerindeyse KGA'da yüksek verim elde edilir, ancak rezonans frekansı çatallanır.

$$L_{mCritical}^2 = \frac{R_L^2 - R^2}{\omega_0^2} \quad (6)$$

$$L_m < \frac{R_L^2 - R^2}{\omega_0^2} \quad (7)$$

$$L_m > \frac{R_L^2 - R^2}{\omega_0^2} \quad (8)$$

Bobinin iç direnci telin uzunluğuna, kalınlığına ve iletken malzemenin iletkenliğine bağlıdır ve **Denklem (9)** ile hesaplanır.

$$R = \rho \frac{1}{s} \quad (9)$$

burada s iletkenin yüzey alanıdır, ρ iletkenlik katsayısıdır ve l iletkenin uzunluğudur. Kablosuz güç iletim sistemlerinde önemli kavramlardan biri de liyakat rakamıdır ve **Denklem (10)** ile hesaplanır [16].

$$U = \frac{\omega L_m}{\sqrt{R_1 R_2}} = k\sqrt{Q_1 Q_2} \quad (10)$$

U liyakat (merit) figürüdür. Q_1 ve Q_2 sırasıyla vericinin ve alıcının kalite faktörleridir. Liyakat Rakamı artırılarak verimlilik artırılabilir. Liyakat rakamını arttırmak için kalite faktörünün veya bağlantı faktörünün artırılması gerekir. Liyakat rakamına bağlı olarak optimum verimlilik **Denklem (11)** ile hesaplanır.

$$\eta_{opt} = \frac{U^2}{1 + \sqrt{1 + U^2}} \quad (11)$$

η optimum verimliliğdir. **Denklemlerden (2), (10)** ve **(11)** bobinlerin öz ve karşılıklı endüktansının verim üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.

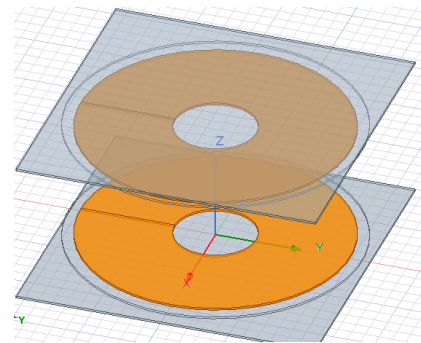
2.1 KGA tasarımı

KGA tasarımı, elektrikli araçlar için kablosuz şarj standardı olan SEA J2954 referans alınarak yapılmıştır [17]. Standartta göre frekansın 79 kHz ile 90 kHz arasında olması gerekmektedir ve 85 kHz ortak frekans bandı belirlenmiştir. Kalite faktörünün etkilerini incelemek amacıyla farklı mesafeler için kalite faktöründe KGA sistemi tasarlanmıştır. Bobinin iç dirençleri ve rezonans kapasitörleri hesaplanmıştır. Bu çalışmadaki 20 kW alıcı-verici, IEC tarafından oluşturulan uluslararası standart "IECTS61980-3" analiz edilerek Ansys Maxwell benzetimi ile tasarlanmıştır [18-20]. **Tablo 1**'de KGA3 aşama referansı referans alınarak tahmin edilen ve tasarlanan 20 kW sınıfı alıcı-vericinin tasarım özellikleri sunulmaktadır. **Şekil 3**'te KGA3 seviye referans modeline göre tasarlanan 20 kW sınıfı alıcı-verici modeli sunulmuştur.

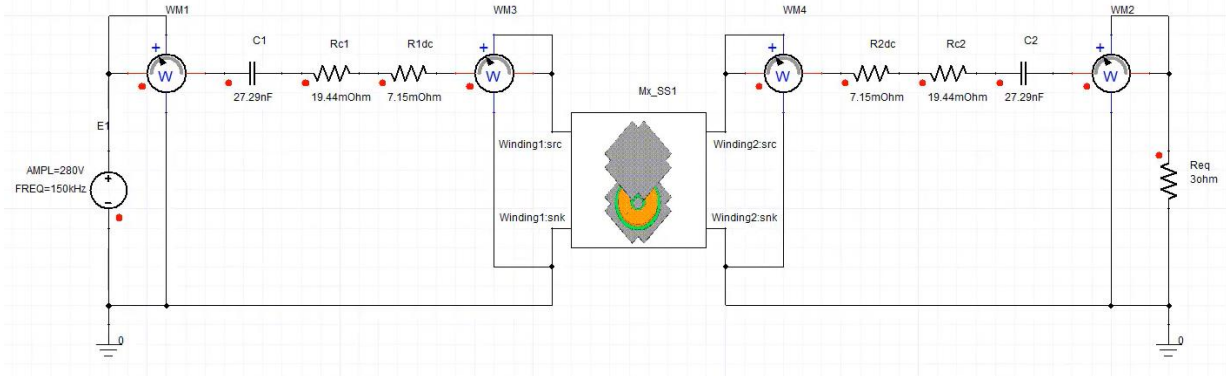
Tablo 1. Tasarlanan alıcı-verici parametresi

	Referans Model		20 kW Model	
Nüve	Tx-Verici	Rx-Alıcı	TX-Verici	Rx-Alıcı
	650x510x5 (mm)	284x284x5 (mm)	590x590x5 (mm)	395x395x5 (mm)
Sargı	2 paralel	10 Sarım	2 Paralel	10 Sarım
	8 Sarım		8 Sarım	10 Sarım
			Litz iletkeni	

Ayrıca, alıcı-vericinin sarım sayısı KGA3 aşaması referans tasarım sonucundaki ile aynıdır. Isı direnci ve yalıtım için Kapton litz tel ile tasarlanmıştır. Tasarlanan KGA transformator modeli **Şekil 2**'de verilmiştir.



Şekil 2. KGA modeli



Şekil 3. Benzetim devresi

3 Bulgular ve tartışma

Tablo 2’de, Tablo 1’e göre üretilen donanımdan elde edilen alıcı-verici parametreleri ve Maxwell modelleme sonuçları listelenmektedir. L_p ve L_s verici ve alıcı tarafın öz endüktansları, k kuplaj katsayısı ve M karşılıklı endüktans değerini ifade etmektedir.

Tablo 2. Alıcı-verici parametre karşılaştırması

Alüminyum Plaka varken	Merkezi hizalama		Yanlış hizalama	
	Ölçüm	Benzetim	Ölçüm	Benzetim
T_x -Öz endüktans- L_p	79.82 μH	78.94 μH	82.85 μH	84.22 μH
R_x -Öz endüktans- L_s	78.17 μH	77.96 μH	77.31 μH	78.02 μH
Karşılıklı endüktans L_m	23.01 μH	24.02 μH	17.62 μH	18.94 μH

Verici ve alıcı tarafın öz endüktansı hizalama koşullarına bağlı olarak önemli ölçüde değişmez. Fakat bağlantı katsayısı ve karşılıklı endüktans büyük ölçüde değişir. Kuplaj katsayısı 0.1987-0.3096 aralığına sahiptir. Maxwell modelleme sonuçları ve donanımdan çıkarılan parametreler çok az bir hataya sahiptir. Öz endüktans, hizalama (0, 0) koşulu altında ölçülen değere sabitlenir ve IPT sistem analizi, her hizalama için yalnızca kuplaj katsayısı ve karşılıklı endüktans değişimi dikkate alınarak gerçekleştirilir. Büyük kaçak akı ve elektromanyetik parazite sorununu çözmek için, alıcı-vericiye alüminyum gibi yüksek iletkenliğe ve düşük manyetik geçirgenliğe sahip paramanyetik bir malzeme monte edilmelidir [17]. Bu girişimin nedeni, bir alüminyum plaka manyetik bir akıya maruz kalırsa, alüminyum plakada bir girdap akımı oluşmasıdır. Bu girdap akımı, kaçak manyetik akıyı elimine edecek yönde bir manyetik akı oluşturur. Ancak, toplam manyetik akı azaldığı için L_p , L_s , k ve L_m değerleri azalır. Tablo 3’te, alüminyum plaka ile donatılmış sistemden elde edilen her hizalama için alıcı-verici parametreleri sunulmuştur. Alüminyum plaka boyutu, KGA1/KGA2/KGA3 referans tasarımının ortak boyutuna göre tasarlanmıştır. Tablo 3, L_p , L_s , k ve L_m değerlerinin Tablo 2’deki ilgili değerlere kıyasla daha düşük olduğunu göstermektedir.

Tablo 3. Alıcı-verici parametresi

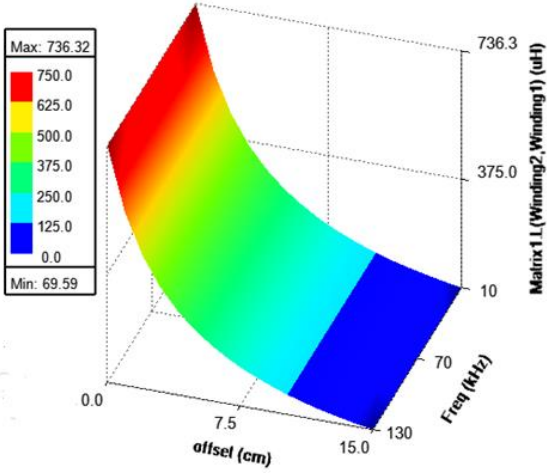
Alüminyum plaka yokken	Merkezi hizalama	Yanlış hizalama
	Ölçüm	Ölçüm
T_x -Öz endüktans- L_p	60.93 μH	62.74 μH
R_x -Öz endüktans- L_s	65.04 μH	64.43 μH
Karşılıklı endüktans L_m	11.71 μH	8.95 μH

3.1 Q faktörü analizi

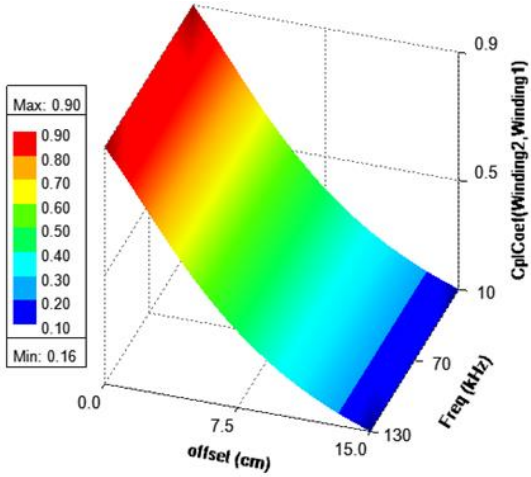
Kablosuz Güç Transferi (KGA) sistemlerinde Q faktörü analizi oldukça önemlidir. Q faktörü, bir rezonans devresinin enerji depolama ve dağıtma yeteneğini ölçen önemli bir parametredir. KGA sistemlerinde bu faktör, verimliliği ve enerji transferinin etkinliğini değerlendirmek için kullanılır. Bu faktörün yüksek olması enerji depolama kapasitesinin yüksek olduğunu ve enerjinin daha uzun mesafelere iletilmesine olanak tanıdığını gösterir. Q faktörünü hesaplanırken, rezonans frekansı ile bant genişliği arasındaki ilişkiyi göz önünde bulundurulmalıdır. İdeal olarak, yüksek bir Q faktörü elde etmek için bant genişliği dar ve rezonans frekansı yüksek olmalıdır. Yüksek bir Q faktörü, enerji transferinin daha verimli olduğu anlamına gelir. Ancak, bu, diğer faktörlerle birlikte düşünülmelidir, çünkü yüksek Q faktörüne sahip bir sistem, frekansta değişikliklerle daha hassas olabilir. Bu nedenle, Kablosuz Güç Transferi sistemlerinde Q faktörü analizi, sistem performansını ve tasarımını optimize etmek için önemli bir adımdır. Bu durum, kablosuz güç transferi sistemlerinin tasarım ve performans optimizasyonu için önemlidir. Bu faktör, bir sistemdeki enerji kaybının ne kadar az olduğunu gösterir. KGA’nın verimliliği, kalite faktörünün artırılmasıyla düşük bağlantı faktörlerinde elde edilir. Rezonatörün kalite faktörü, frekansı sabit tutarken endüktansı artırarak geliştirilebilir. Ancak bu artışın aynı zamanda daha yüksek iç dirence ve dolayısıyla daha düşük maksimum verimliliğe de yol açtığı unutulmamalıdır. Ayrıca kalite faktörünün artırılması kapasitör üzerindeki gerilim stresini artırır. Alıcı ve verici bobinleri arasındaki karşılıklı endüktansın hava boşluğu ve frekansa göre değişimi Şekil 4’te verilmiştir. Bağlaşım faktörü, frekans ve hava aralığı grafiği Şekil 5’te verilmiştir.

Hesaplamalar, kritik karşılıklı endüktansın altındaki düşük karşılıklı endüktansta kalite faktörünün artmasıyla

verimliliğin arttığını ortaya çıkardı. KGA düşük hava aralığında gerçekleştiriliyorsa düşük kalite faktörü tercih edilmelidir.



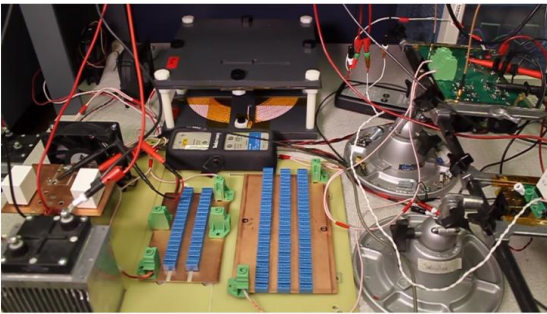
Şekil 4. Karşılıklı endüktansın hava boşluğuna göre değişimi



Şekil 5. Bağlaşım faktörü, frekans ve hava aralığı grafiği

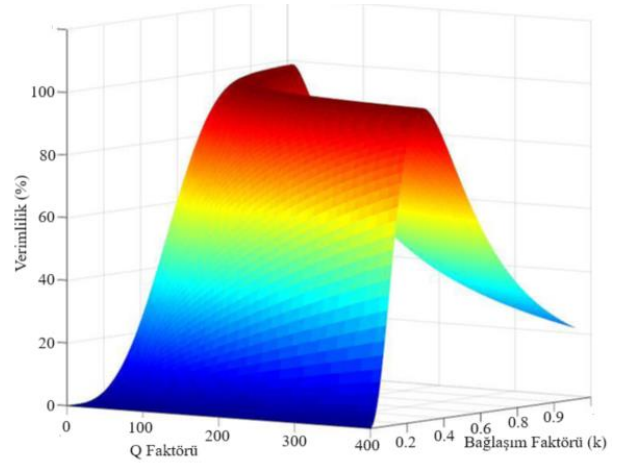
3.2 Deneysel sonuçlar

Bu çalışmada deneysel doğrulama için literatürde yapılmış olan deneysel bir veri kullanılmıştır. Deneysel olarak elde edilen verinin benzetim çalışması yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneysel düzeneği Şekil 6'da gösterilmektedir [20].



Şekil 6. KGA deney düzeneği

Son olarak seçilen KGA sistemi performans doğrulama deneyi, her bir hizalama ve batarya şarj profilinin tüm aralığında gerçekleştirilmiştir. Yük, elektronik yük aracılığıyla simüle edilmiştir. Literatürde verici ve alıcının ölçüm cihazıyla uyumluluğunu sağlamak için LC eşleştirme devreleri sıklıkla kullanılmaktadır. Karakteristik empedans ölçüm cihazlarında devreyi ölçmek için direnç değerlerini birbirine uyarlayan eşleştirme devreleri tasarlanmıştır. Bu çalışmada, eşleştirmenin geniş bantta (düşük Q) olmasını sağlamak için bir eşleştirme devresi kurulmuştur. Kalite faktörü, verimlilik ve bağlaşım katsayısı grafiği Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Kalite faktörü, verimlilik ve bağlaşım katsayısı grafiği

KGA sisteminin verimliliği, değişen farklı hava boşluklarında ve frekanslar aralığında değerlendirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, kritik hava aralığının altındaki hava boşluklarında rezonans frekansları çatallanmakta ve rezonans frekanslarında maksimum verim alınabilmektedir. Bağlaşım faktörü arttığında yani hava aralığı azaldığında rezonans frekansındaki çatallanmalar doğal açısal frekansa yaklaşır. Frekans çatallanmalarının ortadan kalkması için sınırın kritik hava boşluğu olduğu gözlemlenmiştir. Kritik hava aralığı aşıldığında tek rezonans frekansı oluşmuş ve verim düşmeye başlamıştır. Tablo 4'te deneysel ve benzetim sonuçları tüm durumlar için karşılaştırılmıştır.

Tablo 4. Sonuçların karşılaştırılması

	Deneysel sonuçlar	Benzetim sonuçları
Verimlilik (%)	94.86	95.25
Karşılıklı endüktans (μH)	24.83	24.75
Q faktör değeri		334

Yüksek kaliteli faktör tasarımlarının manyetik alanı, düşük kaliteli faktör tasarımlarına göre daha yüksektir. Grafiklerde tüm tasarımlarda y ekseninde bobin yarıçapından sonra manyetik alan yoğunluğunun daha hızlı azaldığı görülmektedir. Bobin çevresinde oluşan saçılmaların daha yoğun olduğu gözlemlenmiştir. Bu manyetik saçılmalar çekirdek ve ekranlama kullanılarak yönlendirilebilir veya

engellenebilir. Bu çalışma, Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) tarafından belirlenen "IEC TS 61980-3" adlı uluslararası standartı analiz ederek gerçekleştirilmiştir. Maxwell modellemesi, şu anda yürürlükteki uluslararası standartlar arasında en yüksek güç işleme kapasitesine sahip olan KGA3 seviyesi referansı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu, Maxwell benzetim tabanlı modellemenin güvenilirliğini artırmak amacıyla yapılmıştır. Modelleme sonuçları ile KGA3 seviye referans parametrelerinin uyumlu olduğu doğrulanmıştır.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada kablosuz enerji transfer sisteminde kalite faktörünün etkileri incelenmiştir. SAE standardı KGA1 güç sınıfı ve 85 kHz frekans için kalite faktörlü KGA tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda 20 kW bir bataryayı şarj edebilen bir KGA sistemi önerilmiştir. İlk olarak, Ansys Maxwell benzetimi kullanılarak ve uluslararası standartlar göz önünde bulundurularak 20 kW bir alıcı-verici tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Optimum kompanzasyon topolojisi, geliştirilen alıcı-verici ve batarya şarj profiline göre seçilerek ve tasarlanmıştır. Önerilen sisteminin optimum kompanzasyon topolojisi, diğer yapılara göre daha fazla rezonans elemanına sahiptir. Ayrıca, kompanzasyon devresine uygulanan gerilim ve akım stresinin düşük ve tekdüze olması nedeniyle bu topolojinin diğer topolojilere göre maliyet azaltma ve yüksek verimlilik açısından avantajlı olduğu ortaya çıkmıştır. Önerilen sistemin fizibilitesini doğrulamak için KGA sisteminin performansı deneysel olarak doğrulanmıştır. Ayrıca, geliştirilen sisteminin yüksek verimlilik performansı, %95,25'lük maksimum verimliliğe ulaşılarak doğrulanmıştır. Çalışmanın ihtiyacına göre en optimum kalite faktörünün seçilmesi önemlidir. Düşük hava aralığında çalışacak bir sistem için düşük kalite faktörü, yüksek hava aralığında çalışacak bir sistem için ise yüksek kalite faktörü tercih edilmelidir. Aksi takdirde verim düşmektedir. Bu alanda daha fazla deneysel çalışma yapılarak gerçek zamanlı sonuçlar ile bu faktörün etkileri daha çok tartışılabilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 6

Kaynaklar

- [1] W. Hong, S. Lee and H. Lee, Sensorless control of series-series tuned inductive power transfer system, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 70(10), 10578-10587, 2023. <https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3220885>.
- [2] M. Chang, Metamaterial adaptive frequency switch rectifier circuit for wireless power transfer system. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 70(10), 10710-10719, 2023. <https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3220908>.
- [3] R. Xue, K. Cheng and M. Je, High-efficiency wireless power transfer for biomedical implants by optimal resonant load transformation. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 60, 4, 2012. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2012.2209297>.
- [4] A. Bharadwaj, A. Sharma and C. R. Chandupatla, A switched modular multi-coil array transmitter pad with coil rectenna sensors to improve lateral misalignment tolerance in wireless power charging of drone systems. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 24, 2, 2023. <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3220793>.
- [5] M. Moghaddami, A. Sundararajan and A. Sarwat, A power frequency controller with resonance frequency tracking capability for inductive power transfer systems. IEEE Trans Ind Appl 54(2), 1773-1783 2018. <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2779425>.
- [6] Yang, S, Deng, X, Lu, J, Wu, Z and Du, K, Light-load efficiency optimization for an LCC-parallel compensated inductive power transfer battery charger. Electron (Switz) 9(12), 1-13, 2020. <https://doi.org/10.3390/electronics9122080>
- [7] Z. Yi, M. Li, B. Muneer and Q. Zhu, High-efficiency mid-range inductive power transfer employing alternative-winding coils. IEEE Transactions on Power Electronics, 34(7), 6706-6721, 2019. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2872047>.
- [8] Y. Yamada and T. Imura, An efficiency optimization method of static wireless power transfer coreless coils for electric vehicles in the 85 kHz band using numerical analysis. IEEJ, Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 17(10), 1506-1516, 2020. <https://doi.org/10.1002/tee.23661>
- [9] Y. Yamada, K. Sasaki, T. Imura and Y. Hori, Design method of coils for dynamic wireless power transfer considering average transmission power and installation rate. IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC), Kigali, Rwanda, 1-8, 2021. <https://doi.org/10.1109/SPEC52827.2021.9709485>.
- [10] I. Fatih ve K. Orhan, Impedance analysis and variable capacity array application for wireless energy-transfer system via coupled magnetic resonances, Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 8(4), 1005-1020, .2020.
- [11] N. Rasekh, J. Wang and X. Yuan, In-situ measurement and investigation of winding loss in high-frequency cored transformers under large-signal condition. IEEE Open Journal of Industry Applications, 3, 164-177, 2022, <https://doi.org/10.1109/OJIA.2022.3193584>.
- [12] L. Feng, Wireless power transfer tuning model of electric vehicles with pavement materials as transmission media for energy conservation. Applied Energy, 323, 119631, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119631>
- [13] Y. Özüpak, Analysis of the model designed for magnetic resonance based wireless power transfer using FEM. Journal of Engineering Research, 11, 3, 2023. <https://doi.org/10.36909/jer.17631>
- [14] J. Park, 22 kW high-efficiency IPT system for wireless charging of electric vehicles. Journal of Power Electron, 23, 374-386, 2023. <https://doi.org/10.1007/s43236-022-00569-w>

- [15] H. Wang, A special magnetic coupling structure design for wireless power transfer system. IEEE 20th Biennial Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC), 1-2, 2020. <https://doi.org/10.1109/CEFC55061.2022.9940745>.
- [16] I. Hussain and D.K. Woo, Self-inductance calculation of the archimedean spiral coil. *Energies*. 15, 253, 2022 <https://doi.org/10.3390/en15010253>.
- [17] SAE, Wireless power transfer for light-duty plug-in/electric vehicles and alignment methodology, standard No: J2954_202010, 2020. https://www.sae.org/standards/content/j2954_202010/
- [18] International commission on non-ionizing radiation protection (ICNIRP), *Health Phys.*, 99(6), 818, 2020. <https://www.icnirp.org/en/activities/news/news-article/rf-guidelines-2020-published.html>
- [19] IEEE, Standard for safety levels with respect to human exposure to electric, magnetic, and electromagnetic fields, 0 Hz to 300 GHz," in IEEE Std C95.1-2019 (Revision of IEEE Std C95.1-2005/ Incorporates IEEE Std C95.1-2019/Cor 1-2019), 4, 1-312, 2019. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8859679>.
- [20] Y. Özüpak, Analysis of the parameters affecting the efficiency of the wireless power transmission system designed for new generation electric vehicles. *International Journal of Automotive Technology*, 24, 1675–1680, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12239-023-0135-1>





Lityum iyon batarya için dikkat mekanizmalı geçitli tekrarlayan birim (GRU) sinir ağıni temel alan sağlık durumu (SOH) tahmini

State of health (SOH) estimation based on gated recurrent unit (GRU) neural network with attention mechanism for lithium-ion battery

Tuğhan Tunç^{1,*}, Hamit Erdem²

^{1,2} Başkent Üniversitesi, Elektrik & Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06790, Ankara Türkiye

Öz

Günümüzde lityum iyon bataryalar, verimli bir enerji depolama elemanı olarak üretimin ve yaşamın çeşitli alanlarında yeri doldurulamaz bir rol oynamaktadır. Lityum iyon bataryaların sağlık durumu (SOH), enerji depolama sisteminin güvenli çalışması için kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada batarya yönetim sisteminden gelen, yaşlanmaya bağlı olarak değişen gerilim, akım ve sıcaklık profilleri gibi ölçülebilir veriler kullanılmıştır. Bu verilere dayanarak kapasite ile şarj profilleri arasındaki ilişki sinir ağı tarafından öğrenilir. Bu çalışmada ulaşılan deneysel sonuçlar NASA lityum iyon pil veri setine dayanmaktadır. Önerilen dikkat mekanizmalı GRU yöntemi, bataryanın sağlığının tahmininde ortalama mutlak yüzde hata açısından derin öğrenme yöntemlerinden olan LSTM, GRU ve BiLSTM yöntemlerine kıyasla sırasıyla %35, %27 ve %20'ye kadar daha başarılı olduğu görülmüştür. Yapılan benzetim çalışmaları MATLAB ortamında derin öğrenme toolbox'ı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Son yıllarda dikkat mekanizmaları, zaman serisi tahmin modellerinin performansını artırmak için güçlü bir araç olarak ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada, zaman serisi problemlerinin çözümlerinde kullanılan LSTM, BiLSTM ve GRU aynı NASA veri setleri üzerinde denenmiş ve bu üç yöntemden daha hızlı ve basit olmasıyla GRU tercih edilmiştir. Bu çalışmada önerilen mekanizma GRU ile Dikkat Mekanizmasını birleştirerek oluşturulmuş SoH öngörüm mekanizmasıdır.

Anahtar kelimeler: Lityum iyon pil, Sinir ağı, Kalan kullanım ömrü (RUL), Kapasite tahmini, Pilin sağlık durumu (SoH), LSTM, GRU, Çift yönlü LSTM, Dikkat mekanizması

1 Giriş

İçten yanmalı motorların kullanmış olduğu fosil yakıtların çevreye zararlarına olan bilincin artması ve aynı zamanda bu yakıtların tükenebilir kaynak olması temiz yakıt kullanan araçlara olan ilgiyi arttırmıştır. Elektrikli araçlar (EV) bu konuda en çok ilgiyi üzerine toplayan seçenek olmuştur.

Abstract

Lithium-ion batteries play an irreplaceable role in various areas of production and life as an efficient energy storage element. The state of health (SOH) of lithium-ion batteries is critical to the safe operation of the energy storage system. In this study, measurable data from the battery management system, such as voltage, current and temperature profiles that change due to aging, were used. Based on these data, the relationship between capacity and charging profiles is learned by neural networks. The experimental results achieved in this study are based on the NASA lithium-ion battery data set. It has been observed that compared to the LSTM, GRU and BiLSTM methods, which are deep learning methods, the proposed GRU method with attention mechanism is more successful in estimating the health of the battery in terms of average absolute percentage error by up to 35%, 27% and 20%, respectively. The simulation studies were carried out using the deep learning toolbox in the MATLAB environment. In recent years, attention mechanisms have emerged as a powerful tool to improve the performance of time series forecasting models. In this study, LSTM, BiLSTM and GRU, which are used to solve time series problems, were tested on the same NASA data sets, and GRU was preferred because it is faster and simpler than these three methods. The mechanism proposed in this study is the SoH prediction mechanism created by combining GRU and Attention Mechanism.

Keywords: Lithium-ion battery, Neural network, Remaining useful life (RUL), Capacity estimation, Battery state of health (SoH), LSTM, GRU, Bi-directional LSTM, Self-attention mechanism

Elektrikli araçlarda enerjinin depolanabilmesi için bataryalar tercih edilmektedir. Kullanılan bu bataryaların pek çok türü olmasına karşın; geniş sıcaklık aralığında çalışabilmesi, yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması, kendi kendine deşarj oranının az olması ve uzun çevrim ömrü gibi özellikleri sayesinde lityum iyon bataryalar son zamanlarda ulaşım, elektronik, taşınabilir mobil cihazlar ve

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: tughantr06@gmail.com (T. Tunç)

Geliş / Received: 20.12.2023 Kabul / Accepted: 20.02.2024 Yayınlanma / Published: 15.04.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1407480

havacılık gibi çeşitli endüstriyel sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [1].

Bataryalarda yaşanan öncelikli sorun batarya şarj durumunu belirlemek olmuştur. Bataryalar gözle görülür bir fiziksel depolama yapmadıkları için pek çok farklı şarj durumu belirleme (SoC) yöntemi üzerinde çalışılmış ve bu bağlamda pek çok yöntem ortaya konmuştur. Günümüzde en çok kullanılmakta olan Coulomb Sayma Yöntemi gibi farklı SoC belirleme yöntemleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiş ve ortaya konmuştur [2].

Bataryaların şarj durumunu belirleme sorununa farklı yöntemler geliştirdikten sonra insanlık bataryanın sağlık durumunu (SoH) ve bataryanın kalan faydalı ömrünü belirleme sorunu ile karşı karşıya kalmıştır. Prognostik ve sağlık yönetimi (PHM), bileşenlerin bozulmasını tam zamanında tahmin eden ve böylece geleneksel bakım paradigmasını basitleştiren bir yöntemdir [3]. Bunu yaparken kalan faydalı ömür (RUL), bileşen veya sistemin güvenlik kriteri sınırına ulaşılan kadar geçen süre olarak tanımlanır. Bataryaların prognostik ve sağlık yönetimi ise batarya sağlığı ve korunumunun da dahil olduğu, PHM yöntemlerinin batarya alanına uygulanması etkinliğini ifade eder. Arızalara karşı kararlı çalışma perspektifinden sistemin durumunu yüksek güvenilirlikle tahmin etmek önemlidir. ISO 13381-1'e göre prognostik, "tasarım parametreleri dahilinde gelecekteki durumu ve kalan ömrü tahmin etmek için arıza belirtilerinin analizi" olarak tanımlanır [4]. Bu bağlamda pek çok araştırma yapılmış bataryanın ömrünün önceden tahmin edilebilmesi için pek çok farklı yöntem ve metot ortaya konulmuştur. Bu metotlardan biri olan göreceli kapasite kestirim yöntemi, bir batarya hücrelerinin terminal gerilimini incelemek için aynı yük sinyali altında farklı döngü sayıları veya yaşlardaki değişiklikleri kullanır [5].

Yapay Zekânın günümüzdeki gelişimi ile tahmin, öngörü hesaplamalarında alt başlığı olan makine öğrenmesinin yeri artmıştır. Batarya sağlık durumunun makine öğrenmesi ile tahmin edilmesi için tanımlı girdi değerleri kullanılarak k-En Yakın Komşu (kNN) ve Rastgele Orman Regresyon (Random Forest) yöntemleri önerilen yöntemler arasındadır [6]. Bunlara ek olarak batarya sağlık durumunun tahmini hesaplamalarında öz dikkat mekanizması kullanılarak geleneksel yöntemlere kıyasla önemli ölçüde zaman ve iş gücü tasarrufu sağlanmıştır. [7].

Batarya ömrünün önceden tahmin edilebilmesi problemi bir zaman serisi tahmin modelidir. Zaman serisi tahmin modelleri, doğrulanmış geçmiş verilere dayanarak olayları tahmin etmek için kullanılır [8]. Zaman serisi modellerinde daha önce yapılan çalışmalarda Sinir Ağlarının Alt başlığı olan Derin Öğrenme yöntemlerinden Uzun Kısa Dönemli Bellek (Long Short-Term Memory) kullanımının daha başarılı olduğu görülmüştür.

Lityum iyon batarya için ise yapılan çalışmalarda NASA Prognostics Centre of Excellence tarafından yayınlanan veri setinin çok kanallı V, I, T verilerini içeren FNN (İleri Beslemeli Sinir Ağları), CNN (Evrişimsel Sinir Ağları) ve LSTM (Uzun Kısa Dönemli Bellek)'e dayalı bir kapasite tahmin çerçevesi önerilir. FNN ve CNN yöntemlerinden farklı olarak LSTM, kapasiteyi veride anormallikler olmasına rağmen doğru bir şekilde tahmin etmektedir.

Bunun nedeni LSTM'nin uzun süreli bilgi depolayan hafıza hücreli yapısından kaynaklanmaktadır [9]. NASA veri setinin yanı sıra, MIT tarafından yayınlanan veri seti de LSTM ile SoH hesaplanması için ele alınmıştır [10].

Bu çalışmada kullanılan Dikkat Mekanizmaları (Attention Mechanism), farklı parçalara atanan farklı ağırlıklara dayalı olarak dikkatin verinin belirli bölümlerine odaklanmasını sağlamak için derin öğrenme modellerine eklenen bir sinir ağı katmanıdır.

Yapılan çalışmada dikkat mekanizması ile LSTM'in beraber çalıştığı bir SoH öngörüm mekanizması ortaya konulmuştur [11]. Buna ek olarak, BiLSTM (Çift Yönlü Uzun Kısa Dönemli Bellek) zıt yönlerde iki LSTM'den oluştuğundan sıra ile ilgili problemlerde daha iyi performansa sahiptir. BiLSTM, verileri iki LSTM üzerinden zıt yönlerde iletebilir ve tersine çevirebilir, böylece hem geçmiş hem de gelecek bilgileri kullanılabilir. BiLSTM sinir ağı ile Dikkat Mekanizması beraber kullanımının NASA veri seti ile SoH analizi incelenmiştir [12]. Geçitli Tekrarlayan Birim (GRU), Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) ağlarına daha basit bir alternatif olarak 2014 yılında tanıtılan bir tür tekrarlayan sinir ağıdır (RNN). LSTM gibi GRU da metin, konuşma ve zaman serisi verileri gibi sıralı verileri işleyebilir [13]. Bu çalışmada önerilen mekanizma GRU ile Dikkat Mekanizmasını birleştirerek oluşturulmuş SoH öngörüm mekanizmasıdır.

2 Materyal ve metot

2.1 NASA'nın lityum iyon batarya verisi

Bu çalışma NASA Prognostics Center of Excellence Veri Havuzu tarafından sağlanan batarya veri setlerini kullanmaktadır [14]. Bu veri setleri, oda sıcaklığında şarj, deşarj ve dinlenme süresi olmak üzere üç farklı çalışma profilinde çalışan dört lityum iyon bataryadan oluşur. Deneyler, hızlandırılmış yaşlanmayı sağlamak için ticari olarak temin edilebilen 18650 lityum iyon hücrelerine tekrarlanan şarj ve deşarj döngülerinin uygulanmasıyla oluşturulmuştur.

Bataryalar sabit akım sabit gerilim (CCCV) prensibine göre şarj edilir ve bu prensibe göre bataryalar öncelikle 4.2 V üst gerilim sınırına ulaşılan kadar 1.5 A sabit akımda şarj edilmektedir. Ardından 4.2V sabit gerilimde akım 20 mA altına düşene kadar şarj devam eder. Deşarj işlemi ise hücre gerilimi #5, #6, #7 ve #18 bataryaları için sırasıyla 2.7 V, 2.5 V, 2.2 V ve 2.5 V'a düşene kadar 2 A'lik sabit akımda yapılır. Deneyler, bataryalar nominal kapasitenin %20'sini kaybedene kadar, yani 1.6 Ah kapasiteleri kalana kadar gerçekleştirilir.

Bu kapasite düşüşünden sonra bataryalar otomotiv sektöründe kullanılamazlar ve ikincil hayat olarak adlandırılan yerel enerji depolama uygulamalarında; yani güneş paneli, rüzgâr tribünü ve bunun gibi yerlerde kullanılabilirler. Bu veri setinde ek elektrokimyasal empedans verileri de sağlanmaktadır ancak bizim çalışmamızda kullanılmamaktadır.

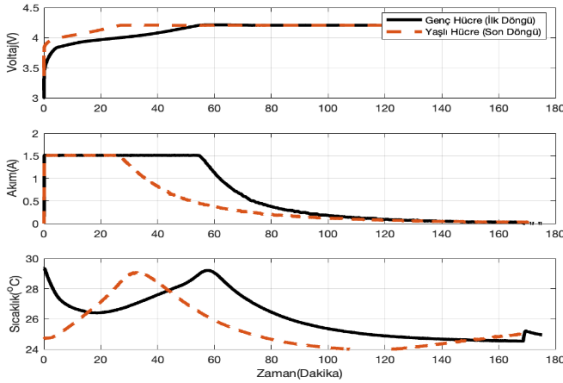
2.2 Şarj/deşarj sürecinde veri toplama

Bataryanın bozulmasını tahmin etmede kritik olan dahili batarya parametrelerinin yaşlanma boyunca nasıl değiştiğini

yakalamak için gerilim, akım ve sıcaklık verilerinden yararlanılmaktadır. Bu verilerin her biri her şarj döngüsünde tekrar ölçülür. Gerçek uygulamada bataryanın üç durumu vardır: bunlar şarj, deşarj ve dinlenmedir.

Elektrikli araçlarda deşarj işlemi sırasında, akım zaman içerisinde hızla ve düzensiz olarak değişmesi nedeniyle iç parametrelerin hassas bir şekilde ölçülmesi veya hesaplanması zordur. Yapılan son araştırmalara göre [15, 16] bataryanın dinlenme periyodunda akımın geçişine bağlı olarak aktif malzemelerin yeniden dengelenmesi ve gradyanlarının gevşemesi süreci mevcuttur. Bu süreç sayesinde kapasite yenilenmesi gerçekleşir. Bu nedenle bataryanın dahili parametreleri genellikle sabittir veya şarj veya deşarj süresine göre yavaş değişir. Bu durum, iç parametrelerin tahminini zorlaştırmaktadır çünkü bu parametreler, belirsiz veri miktarına dayalı olarak hesaplanamamaktadır [17]. Ancak bataryalar genellikle gerekli harici elektrik performansının kolayca ölçülebildiği önceden belirlenmiş protokollere dayalı, sorunsuz bir şarj sürecine sahiptir.

Ayrıca, deşarj düzeni esas olarak sahibinin rutinine bağlıdır ki bu da yüksek rastgelelik ve belirsizlik içerir. Bu sebeple batarya şarj profillerini kullanmak çok daha kolaydır. İncelemekte olduğumuz NASA veri setinde deşarj rutini rastgelelik içermeyecek sabit deşarj akımı ile yapılmış olduğundan yapılan çalışmada deşarj durumu da incelenmiştir.

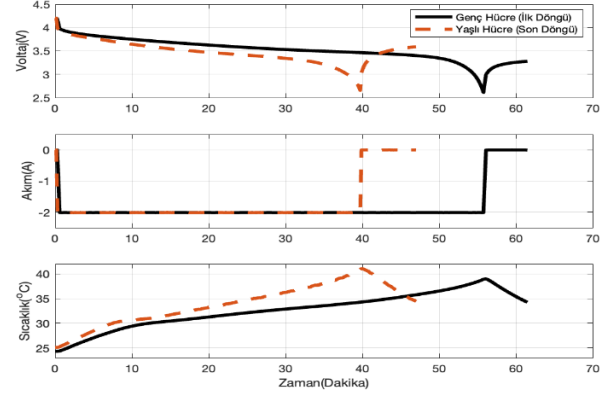


Şekil 1. Yeni ve yaşlandırılmış batarya hücresi gerilim, akım ve sıcaklık şarj grafikleri

2.3 Gerilim, akım ve sıcaklık verileri ile şarj profilleri

Şekil 1 ve 2, NASA veri setinden alınmış olan dört bataryanın yaşlandırılma sürecinde ilk döngüdeki ve son döngüdeki verilerinin çizdirilmesiyle elde edilmiştir. NASA veri seti havuzunda 40'a yakın batarya yaşlandırma veri seti bulunmaktadır. Ancak #5, #6, #7 ve #18 numaralı bataryalara benzer şartlar altında yaşlanma testi yapılmış olunması sebebiyle bu çalışma için bu bataryalar seçilmişlerdir. Bu şekillerde batarya yaşlandıkça gerilim, akım ve sıcaklığın hem şarj hem deşarj profillerinde önemli değişiklikler yarattığını gözlemliyoruz. Şekil 1'de şarj işlemi sırasında yaşlanan hücrenin gerilimi, yeni hücreye göre 4.2V'a daha erken ulaşır ve yaşlanan hücrenin akımı, yeni hücreye göre daha erken sabit akımdan düşmeye başlar. Bunlara ek olarak, yaşlandırılmış hücre maksimum sıcaklığa

yeni hücreden çok daha erken ulaşır. İlk ve son döngünün sıcaklık profillerinin başlangıçlarının farklı olmasının nedeni, tekrarlanan şarj, dinlenme ve deşarj işlemlerinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 2. Yeni ve yaşlandırılmış batarya hücresi gerilim, akım ve sıcaklık deşarj grafikleri

Şekil 2'de deşarjın sonundaki sıcaklık genellikle başlangıca göre arttığından, bu durum bir sonraki şarj profilinin başlangıç sıcaklığını etkiler. Deşarj grafiklerine bakıldığında da şarj grafiklerine çok benzer bir yapı gözlenmektedir. Hem sıcaklık hem gerilim hem de akım değerleri limit değerlere yeni hücreye kıyasla yaşlandırılmış hücre de daha erken ulaşmaktadır. Bataryanın yaşlanmasını ölçmek için SoH'yi doğru şekilde tanımlamamız gerekir. SoH'yi tanımlamanın kabul edilmiş sabit bir yolu olmamasına rağmen, genellikle aşağıdaki şekilde verilen kapasite kullanılarak tanımlanır:

$$SOH(\%) = \frac{C_k}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

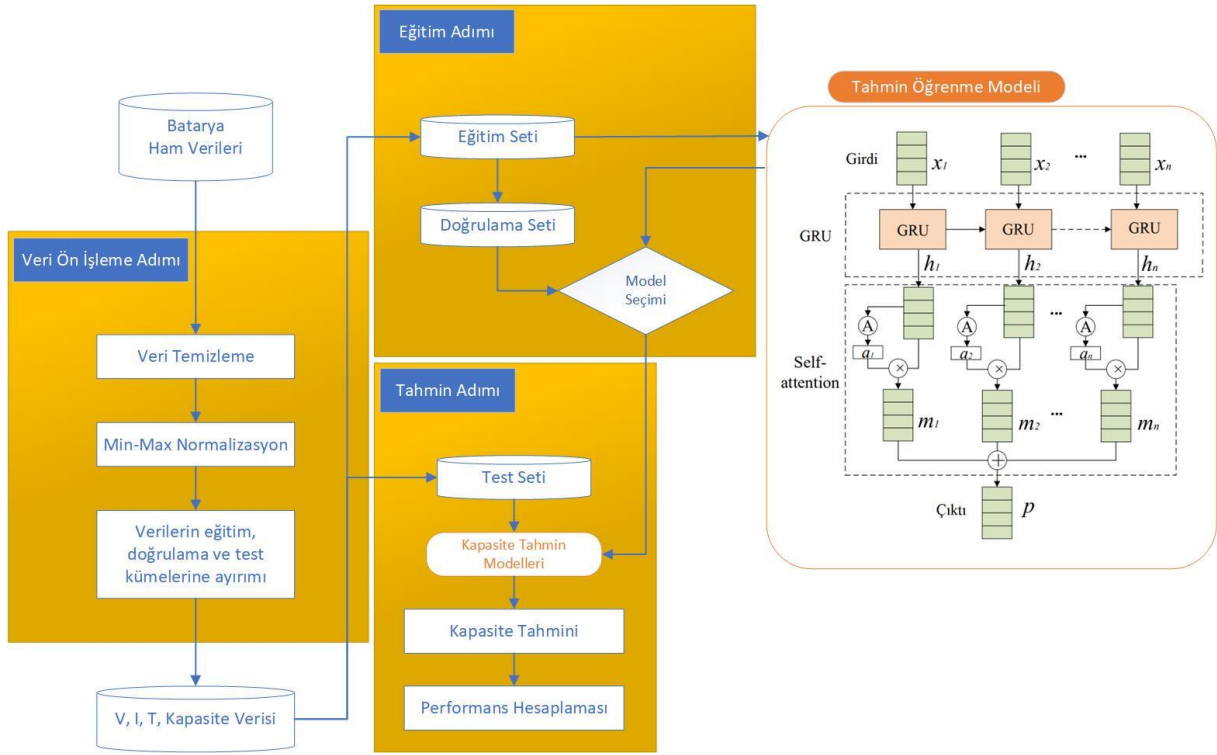
Burada C_0 nominal kapasitedir ve C_k k döngüsündeki ölçülen kapasitedir. Ayrıca, ölçülen kapasite nominal kapasitenin %80'inin altında olduğunda batarya ömrünün bittiğini ve bu durumda güvenilir performansın garanti edilemeyeceğini belirleriz. Bu durum otomotiv sektöründe elektrikli araç garantisi belirlenirken kullanılır.

3 Makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlar

3.1 Önerilen yapı

Şekil 3'te, GRU-AM'ye dayalı çok kanallı şarj profillerinden yararlanarak batarya kapasitesinin tahmin edilmesi için önerilen çerçeveye genel bir bakış sunulmaktadır. Bu çerçeve üç adımdan oluşur: veri ön işleme, eğitim ve tahmin. Veri ön işleme adımında veri temizleme ve min-max normalizasyon teknikleri uygulanarak anormal veriler kaldırılır. Eğitim adımında sırasıyla LSTM, GRU, BiLSTM ve GRU-AM'ye dayalı uygun bir model seçmek için eğitim ve doğrulama setleri kullanılır.

Tahmin adımında ise bir önceki adımda belirlenen kapasite tahmin modellerini kullanarak batarya kapasitesi tahmin edilir ve önerilen yöntemin performansı değerlendirilir.



Şekil 3. Önerilen kapasite tahmininin genel çerçevesi.

Tablo 1. NASA Prognostics Center of Excellence veri havuzunun bataryalarının özellikleri

Batarya Numarası	Şarj			Deşarj		Ortam Koşulları	
	Sabit Akım (A)	Üst Gerilim Limit (V)	Şarjı Kesme Akımı (mA)	Sabit Akım (A)	Deşarjı Kesme Gerilimi (V)	Ortam Sıcaklığı	Başlangıç Kapasiteleri (Ah)
Batarya 5	1.5	4.2	20	2	2.7	Oda Sıcaklığı	1.86
Batarya 6	1.5	4.2	20	2	2.5	Oda Sıcaklığı	2.04
Batarya 7	1.5	4.2	20	2	2.2	Oda Sıcaklığı	1.89
Batarya 18	1.5	4.2	20	2	2.5	Oda Sıcaklığı	1.86

3.2 Veri ön işleme

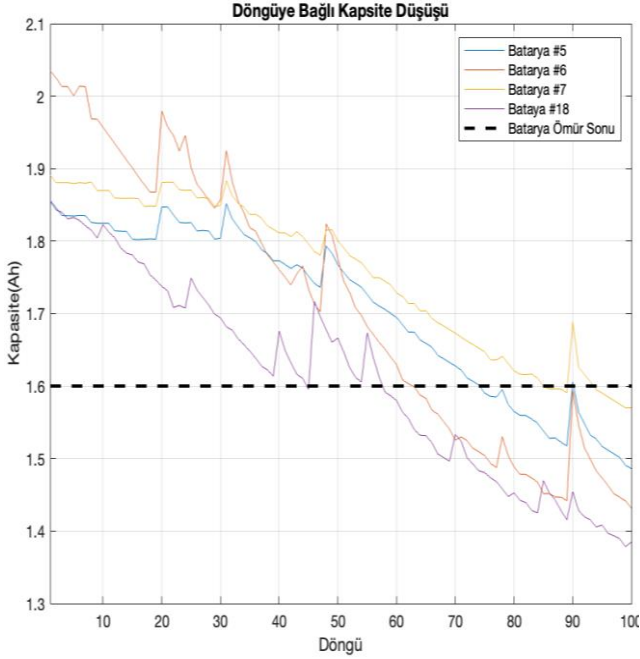
Batarya veri setini deneysel veri olarak kullanmadan önce, aykırı değerleri kaldıracak ve mevcut verileri güvence altına alacak veri ön işleme yapılır. Sonunda, Şekil 4'te olduğu gibi döngü başına bozulma özelliklerine sahip dört set batarya verisi elde edilmiş olur. Şekil 4'te deney için #5, #6, #7 ve #18 numaralı bataryalar seçilmiştir. Bataryaların genel özellikleri ve şarj/deşarj koşulları Tablo 1'de özetlenmiştir. Tahminde veri hassasiyeti ve karmaşıklığı nedeniyle tüm verilerin kullanılması verimli değildir. Batarya Yönetim Sisteminin (BMS) ayarına göre şarj işlemi sırasında çok sayıda veri noktası olmasına rağmen, şarj aralığı sırasında görünen değişiklikleri koruyan alt örneklenmiş verileri kullanırız. Önerilen modellerin girdileri çıkarılan özneliklerdir. Bunlar, ham batarya verilerinin tekdüze örneklenmesiyle elde edilir. Spesifik olarak, her biri 10 örnek içeren V, I, T şarj etme profillerini birleştirerek giriş

matrisini 30 boyutlu vektörler olarak yapılandırılır. Örnek sayısı, zamandaki belirgin değişiklikleri ve model karmaşıklığını dikkate alacak şekilde seçilir. Ek olarak, kısa zaman aralığında salınımı önlemek için örnekleme aralığı boyunca verilerin ortalaması alınır.

Min-max normalizasyon, ölçeklendirme faktörü dışında, verilerin orijinal dağılımını koruduğu ve daha iyi eğitim yapılabilmesine olanak sağladığı için kullanılır. Min-max normalizasyon, bütün verileri [0,1] aralığına taşır.

$$z_i^k = \frac{x_i^k - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad i \in \{1, \dots, n\} \quad (2)$$

Burada x , tüm şarj döngülerinin bir toplamıdır. Yani x_i^k ve n , döngü başına örnek sayısını temsil eder. Nihai tahmin sonuçlarını sunmadan önce denormalizasyon yapılır.



Şekil 4. Döngüye bağlı kapasite düşüşü

3.3 Uzun kısa dönemli bellek (Long Short-Term Memory)

Özyinelemeli Sinir Ağı (Recurrent Neural Network), bellekte yönlendirilmiş döngüler içeren ve özellikle sıralı verilerde üstün performans gösteren bir sinir ağıdır. Kaybolan gradyan sorunu nedeniyle, zaman serisi verileri uzun vadeli bağımlılığa sahip olduğunda temel RNN yapısı doğru sonuçtan uzaklaşabilirler. Bu nedenle, kaybolan gradyan problemini azaltmak için LSTM tasarlanmıştır. Ortak bir LSTM ünitesi bir hücre, bir giriş kapısı, bir çıkış kapısı ve bir unutma kapısı olmak üzere üç kapıdan oluşur. Hücre, değerleri rastgele zaman aralıklarında hatırlar ve bu üç kapı, hücrenin içine ve dışına bilgi akışını düzenler. LSTM, uzun vadeli bilgileri depolamak için dahili bir bellek hücresi durumunu tanımlar. Bellek hücresi durumu, dahili durum vektörünün hangi öğelerinin güncellenmesi, korunması veya silinmesi gerektiğini belirlemek için önceki çıkış ve sonraki girişle etkileşime girer.

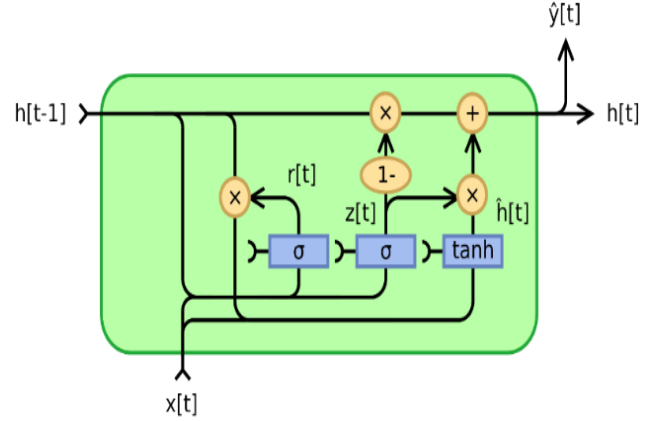
3.4 Çift yönlü uzun kısa dönemli bellek (Bi-Directional Long Short-Term Memory)

BiLSTM sinir ağı zıt yönlerde iki LSTM sinir ağından oluşur ve bu sayede sıra ile ilgili problemlerde daha iyi performansa sahiptir. BiLSTM sinir ağı, verileri iki LSTM üzerinden zıt yönlerde ileri ve geri işleyebilir, böylece hem geçmiş hem de gelecek bilgileri kullanarak eğitilebilmiş olur.

3.5 Geçitli tekrarlayan birim (Gated Recurrent Units)

GRU'nun arkasındaki temel fikir, her zaman adımında ağız gizli durumunu seçici olarak güncellemek için geçit mekanizmalarını kullanmaktır. Geçit mekanizmaları, ağız içine ve dışına bilgi akışını kontrol etmek için kullanılır. GRU'nun sıfırlama kapısı ve güncelleme kapısı adı verilen iki geçit mekanizması vardır. Sıfırlama kapısı önceki gizli durumun ne kadarının unutulması gerektiğini belirlerken,

güncelleme kapısı gizli durumu güncellemek için yeni girişin ne kadarının kullanılması gerektiğini belirler. GRU'nun çıktısı, güncellenen gizli duruma göre hesaplanır. Aşağıda tipik GRU yapısı ve açıklamaları gösterilmektedir [13]:



Şekil 5. Tipik GRU Yapısı

Sıfırlama Kapısı:

$$r_t = \sum (W_r * [h_{t-1}, x_t]) \quad (3)$$

Güncelleme Kapısı:

$$z_t = \sum (W_z * [h_{t-1}, x_t]) \quad (4)$$

Aday Gizli Durum:

$$\hat{h}_t = \tanh(W_h * [r_t * h_{t-1}, x_t]) \quad (5)$$

Gizli Durum:

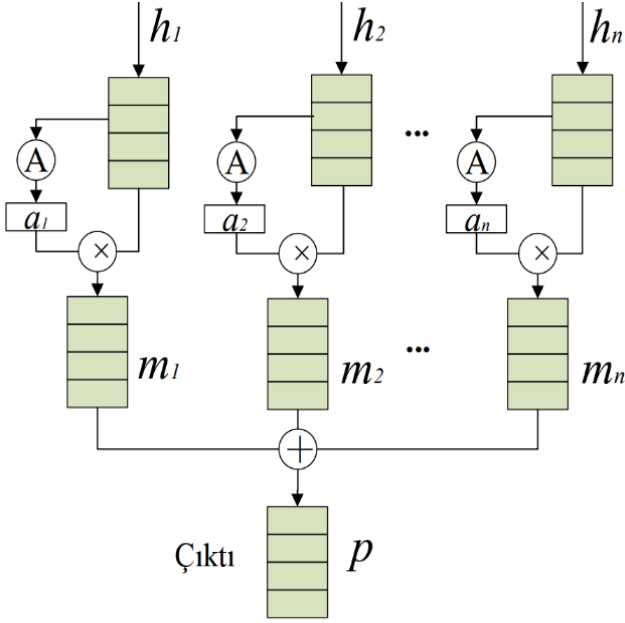
$$h_t = (1 - z_t) * h_{t-1} + z_t * \hat{h}_t \quad (6)$$

Burada W_r , W_z ve W_h öğrenilebilir ağırlık matrisleridir. x_t , t zaman adımındaki girdidir. h_{t-1} önceki gizli durumdur ve h_t mevcut gizli durumdur.

3.6 Öz dikkat mekanizması (Self Attention Layer)

Öz-dikkat mekanizması, modelin girdi verilerindeki uzun vadeli bağımlılıkları yakalamasına yardımcı olur, bu da görüntünün farklı bölümlerini birbiriyle ilişkilendirmeyi öğrenebileceği anlamına gelir. Önerilen model, bir GRU katmanından sonra öz dikkat katmanını ekleyerek, giriş görüntüsünün farklı bölgeleri arasındaki mekânsal ilişkileri dikkate alır ve özellik temsil yeteneklerini geliştirir. Aşağıdaki adımlar sırasıyla dikkat mekanizması içerisinde gerçekleşir:

1. Girişteki sorguları, anahtarları ve değerleri hesaplar.
2. Sorguları, anahtarları ve değerleri kullanarak ölçeklendirilmiş nokta çarpım dikkati hesaplar.
3. Alınan sonuçları birleştirir.
4. Birleştirilmiş sonuç üzerinde doğrusal bir dönüşüm gerçekleştirir.



Şekil 6. Öz-Dikkat Mekanizması girdiden çıktıya basit gösterim

Öz-Dikkat Mekanizması aşağıdaki şekilde tanımlanabilir [18];

$$\begin{aligned}
 e_t &= \sum (W_a \cdot h_t + b_a) \\
 a_t &= \text{softmax}(e_t) \\
 m_t &= a_t \cdot h_t \\
 p &= \sum_{t=1}^n m_t
 \end{aligned} \quad (8)$$

Burada h_t GRU modelinin çıktısı olan dikkat katmanının girdisidir. W_a eğitim sürecindeki ağırlıklı matrisleri, b_a ise sapmaları temsil etmektedir. a_t , Şekil 6'daki A'yı oluşturur, bu da dikkat matrisi anlamına gelir. p , dikkat katmanının çıktısıdır.

4 Model seçimi

Doğrulama setini kullanarak LSTM, BiLSTM, GRU ve GRU-AM yapıları test edilmiştir. Her öğrenme yöntemi MATLAB R2023b'de 3.49 GHz Apple Silicon M2 CPU ve 8 GB belleğe sahip cihaz üzerinde uygulanmıştır. Ortalama eğitim süresi 20 saniyeden azdır ve düzenleme için ayrılma süresi 0.5'tir.

Kayıp fonksiyonu olarak ortalama karesel hata (Mean Squared Error) kullanılmıştır ve Adam optimizasyonu 0.001 öğrenme oranıyla kullanılmıştır. Eğitim dönemleri (Training Epochs) 500 olarak ayarlanmıştır ve parti boyutu (Batch Size) 50 olarak kullanılmıştır. Tahmin doğruluğunu değerlendirmek için, ortalama mutlak yüzde hatası (MAPE) aşağıdaki gibi temsili bir hata indeksi olarak benimsenmiştir:

$$MAPE(\%) = \frac{100}{K} \sum_{k=1}^K \frac{|l(k) - \hat{l}(k)|}{l(k)} \quad (9)$$

Burada $l(k)$ gerçek kapasiteyi temsil eder, $\hat{l}(k)$ tahmin edilen kapasiteyi temsil eder ve K döngü sayısını temsil eder. Ek olarak, ortalama mutlak hata (MAE) ve ortalama karekök hata (RMSE) şu şekilde hesaplanmıştır:

$$MAE = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |l(k) - \hat{l}(k)| \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (l(k) - \hat{l}(k))^2} \quad (11)$$

5 Sonuçlar

Bu bölümde SOH tahmini için önerilen yöntemin performansı dört batarya (Batarya #5, Batarya #6, Batarya #7 ve Batarya #18) üzerinde test edilmiştir. Deney sonuçları Tablo 2-5'te gösterilmektedir. Bu tabloların daha kolay yorumlanabilmesi için Tablo 6'da tüm deney sonuçları tablolarının (Tablo 2-5) ortalaması alınarak toparlayıcı bir sonuç tablosu elde edilmiştir. Aynı parametre ayarları altında, dört bataryanın SOH tahmini için önerilen GRU-AM yöntemi, LSTM, GRU ve BiLSTM yöntemleri ile performans yönünden karşılaştırılmıştır. Tablo 2-5 ayrı ayrı değerlendirildiğinde görülebilmektedir ki sonuç hepsinde benzerdir. Tablo 7'de kıyaslanan her yönteme göre GRU-AM yönteminin ne kadar başarılı olduğu sırasıyla yüzdelik olarak tablo halinde gösterilmiştir. Tablo 7 oluşturulmuş Tablo 6'da elde edilmiş veriler göz önünde bulundurulmuş, GRU-AM değerleri ile LSTM, GRU ve BiLSTM değerleri arasındaki fark hesaplanarak yüzdelik biçimde yazılmıştır. LSTM, GRU ve BiLSTM'in zaman serisi tahmininde iyi bir performansa sahip olduğunu belirtmek gerekir. Bu nedenle önerilen yöntemle karşılaştırılmaları uygun olacaktır.

Şekil 7-10'dan görülebileceği gibi, öncelikle önerilen yöntemin tahmin sonuçları gerçek verilere daha yakındır ve döngü sayısı arttıkça, kapasiteler azaldıkça, tahmin sonuçları daha doğrudur. GRU-AM modeli dikkat mekanizması sayesinde, eğitim sürecinde iyileştirilir. Bu sayede kapasite tahmini nispeten düzgün olur. Bu, AM'nin tahmin performansını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Şekil 7-10 ayrı ayrı değerlendirildiğinde göze çarpan BiLSTM'in yer yer gerçek değerden çok sapma yaşamasıdır. Bu durum BiLSTM'in hem gelecek hem de geçmiş bağımlılıkları sebebiyledir.

Tablo 6'da her batarya için elde edilmiş hata tahminlerinin ortalaması alınmış ve daha toparlayıcı bir sonuç elde edilmiştir. Tablo 6'da ki hata değerlerinin genel ortalaması gösteriyor ki genel başarı kıstas alındığında her hata değerinde, önerilen model en başarılı sonucu elde etmiştir. Dolayısıyla SOH tahmininde GRU-AM'nin LSTM, GRU ve BiLSTM'den daha doğru ve güvenilir olduğu kanıtlanmaktadır.

Tablo 2. Batarya #5 tahmin hataları

#5	Modeller	RMSE	MAE	MAPE (%)
1	LSTM	0.0457	0.0162	0.9951
2	GRU	0.0407	0.0159	0.9815
3	BiLSTM	0.0625	0.0164	0.9739
4	GRU-AM	0.0329	0.0136	0.8433

Tablo 3. Batarya #6 tahmin hataları

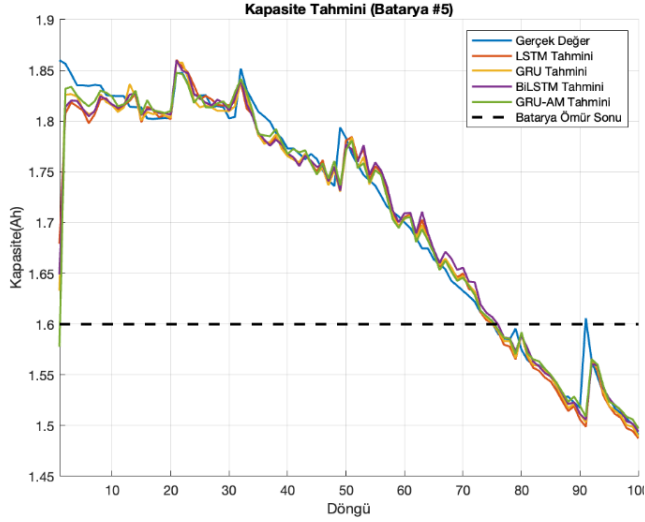
#6	Modeller	RMSE	MAE	MAPE (%)
1	LSTM	0.0375	0.0280	1.8820
2	GRU	0.0420	0.0319	2.1387
3	BiLSTM	0.0358	0.0267	1.7761
4	GRU-AM	0.0272	0.0191	1.2399

Tablo 4. Batarya #7 tahmin hataları

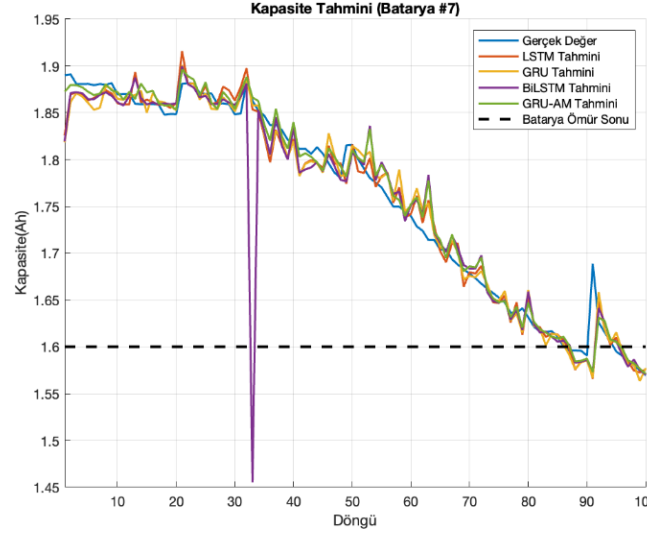
#7	Modeller	RMSE	MAE	MAPE (%)
1	LSTM	0.0197	0.0134	0.8132
2	GRU	0.0196	0.0137	0.8321
3	BiLSTM	0.0174	0.0116	0.7026
4	GRU-AM	0.0281	0.0101	0.5964

Tablo 5. Batarya #18 tahmin hataları

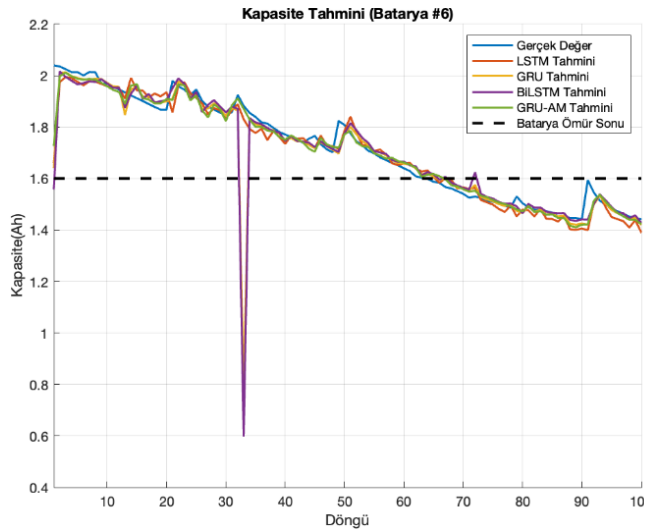
#18	Modeller	RMSE	MAE	MAPE (%)
1	LSTM	0.0758	0.0297	1.8382
2	GRU	0.0401	0.0189	1.1902
3	BiLSTM	0.0371	0.0187	1.1844
4	GRU-AM	0.0367	0.0175	1.1008



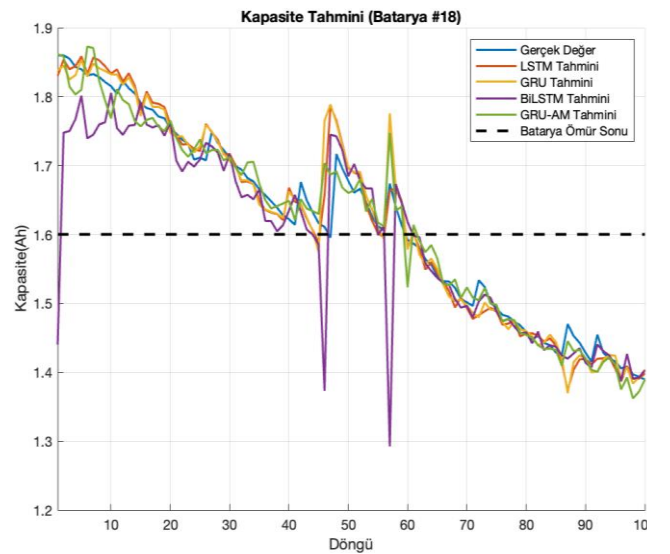
Şekil 7. Batarya #5 kapasite tahmini



Şekil 9. Batarya #7 kapasite tahmini



Şekil 8. Batarya #6 kapasite tahmini



Şekil 10. Batarya #18 kapasite tahmini

Tablo 6. Batarya #18 tahmin hataları

Ort.	Modeller	RMSE	MAE	MAPE (%)
1	LSTM	0.0336	0.0190	1.2700
2	GRU	0.0286	0.0178	1.1981
3	BiLSTM	0.0300	0.0170	1.1369
4	GRU-AM	0.0249	0.0140	0.9398

Tablo 7. Önerilen GRU-AM yönteminin diğer yöntemlere kıyasla yüzdelik başarısı

Vs	Modeller	RMSE	MAE	MAPE
1	LSTM vs GRU-AM	34.60%	35.54%	35.14%
2	GRU vs GRU-AM	14.64%	26.96%	27.48%
3	BiLSTM vs GRU-AM	20.16%	21.25%	20.97%

Önerilen modelin kıyaslanmakta olduğu modellere göre ne kadarlık bir hata tahmini iyileştirmesi yapmış olduğu **Tablo 7**'de görülmektedir. Bu tablo göstermektedir ki önerilen yöntem (GRU-AM) kıyaslandığı yöntemlere göre RMSE'de %14 ila %35, MAE'de %21 ila %36 ve MAPE'de %21 ila %35'lik iyileştirme göstermiştir. BiLSTM hem gelecek hem de geçmiş bağımlılıkları sebebiyle, LSTM ve GRU ise Dikkat Mekanizmasına sahip olmayışlarıyla önerilen yöntemin gerisinde kalmışlardır.

6 Değerlendirmeler

Bu yazıda, lityum iyon bataryalar için Dikkat Mekanizmalı Geçitli Tekrarlayan Birim yöntemi ile bir kapasite tahmin çerçevesi önerilmiştir. Bu yöntem önerisi problemimizin zaman serisi problemi olmasına dayandırılarak seçilmiştir. Zaman serisi problemlerinde başarılı olan hem Geçitli Tekrarlayan Birim hem de Dikkat Mekanizması birlikte kullanılarak daha başarılı bir yöntem geliştirilmiştir. NASA'nın lityum iyon batarya veri setini kullanarak tahmin sonuçları hata indeksleri ve döngü başına kapasite farkı perspektifinden de analiz edilmiştir.

Özellikle önerilen GRU-AM yönteminin; LSTM, GRU ve BiLSTM'e kıyasla sırasıyla %35, %27 ve %20'ye kadar MAPE iyileştirmesi ile mevcut yöntemlerden daha iyi performans verdiği gösterilmiştir. Son olarak dikkat mekanizmalı geçitli tekrarlayan birim yöntemi sonraki çalışmalarda batarya yönetim sistemine entegre edilip gerçek araçlarda test edilerek bataryanın kalan faydalı ömrü tespiti için kullanılabilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %13

Kaynaklar

[1] L. Zhang, T. Ji, S. Yu, and G. Liu, Accurate prediction approach of soh for lithium-ion batteries based on LSTM method. *Batteries*, 9 (3), 177, 2023. <https://doi.org/10.3390/batteries9030177>

- [2] E. İ. Tezde and H. İ. Okumuş, Batarya Modelleri ve Şarj Durumu (SoC) Belirleme. *EMO Bilimsel Dergisi*, 8 (1), 21–25, 2018.
- [3] E. Zio, Prognostics and Health Management (PHM): Where are we and where do we (need to) go in theory and Practice. *Reliability Engineering; System Safety*, 218, 108119, 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2021.108119>
- [4] ISO 13381-1:2004, Condition Monitoring and Diagnostics of Machines Prognostics Part1: General Guidelines. International Standards Organisation, Geneva, Switzerland, Nov. 2004.
- [5] T. Sarıkurt and A. Balıkcı, A relative capacity estimation method for lithium batteries used in electric vehicle applications. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 24 (5), 809–816, 2018. <http://doi:10.5505/pajes.2018.58224>
- [6] E. Çavuş and İ. Sancaktar, Batarya sağlık durumunun makine öğrenmesi ile kestirimi. *NOHU J. Eng. Sci.*, 11 (3), 601–610, 2022, <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1112985>
- [7] Y. Jiang, Y. Chen, F. Yang, and W. Peng, State of health estimation of lithium-ion battery with automatic feature extraction and self-attention learning mechanism. *Journal of Power Sources*, 556, 232466, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109690>
- [8] Time Series forecasting methods, Techniques & Models, InfluxData, <https://www.influxdata.com/time-series-forecasting-methods/>, Accessed 3 December 2023.
- [9] Y. Choi, S. Ryu, K. Park, and H. Kim, Machine learning-based lithium-ion battery capacity estimation exploiting multi-channel charging profiles. *IEEE Access*, 7, 75143–75152, 2019. <https://doi.org/10.1002/er.7160>
- [10] I. Jorge, T. Mesbahi, A. Samet, and R. Boné, Time series feature extraction for lithium-ion batteries state-of-health prediction. *Journal of Energy Storage*, 59, 106436, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106436>
- [11] J. Zhang, J. Hou, and Z. Zhang, Online state-of-health estimation for the lithium-ion battery based on an LSTM neural network with attention mechanism. 2020 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2020. <https://doi:10.1109/ccdc49329.2020.9164547>
- [12] Y. Guo, D. Yang, K. Zhao, and K. Wang, State of Health Estimation for lithium-ion battery based on bi-directional long short-term memory neural network and attention mechanism. *Energy Reports*, 8, 208–215, 2022. <https://doi:10.1016/j.egy.2022.10.128>
- [13] Gated Recurrent Unit Networks. <https://www.geeksforgeeks.org/gated-recurrent-unit-networks/amp>, Accessed 3 December 2023.
- [14] Prognostics Center of Excellence Data Set Repository, NASA. <https://www.nasa.gov/intelligent-systems-division/discovery-and-systems-health/pcoe/pcoe-data-set-repository/>, Accessed 3 December 2023.

- [15] L. He et al., Battery-aware Mobile Data Service. IEEE Transactions on Mobile Computing, 16 (6), 1544–1558, 2017. <http://doi:10.1109/tmc.2016.2597842>
- [16] M. Rashid and A. Gupta, Effect of relaxation periods over cycling performance of a Li-Ion Battery. Journal of The Electrochemical Society, 162 (2), 2015. <https://doi:10.1149/2.0201502jes>
- [17] J. Wu, C. Zhang, and Z. Chen, An online method for lithium-ion battery remaining useful life estimation using importance sampling and neural networks. Applied Energy, 173, 134–140, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.057>
- [18] L. Yang, G. Liu, Y. Dai, J. Wang, and J. Zhai, Detecting stealthy domain generation algorithms using heterogeneous deep neural network framework. IEEE Access, 8, 82876–82889, 2020. <https://doi:10.1109/access.2020.2988877>





Optimization of hot air drying conditions of purple-fleshed potato

Mor etli patatesin sıcak hava kurutma koşullarının optimizasyonu

Katibe Sinem Coruk^{1,*} , Hande Baltacıoğlu² 

^{1,2} Niğde Ömer Halisdemir University, Food Engineering Department, 51240, Niğde Türkiye

Abstract

One of the most popular techniques for preserving fruits and vegetables is drying. Many drying methods have advantages and disadvantages. The purpose of this study was to optimize the hot air drying conditions of a novel variety of purple-fleshed potatoes with the response surface method (RSM) by considering the duration of the steaming process applied before drying, slice thickness, and drying temperature. The optimum drying conditions were determined by analyses such as total phenolic compound, antioxidant activity, chroma, and starch ratio in purple-fleshed potato powders obtained as a result of drying by considering different drying temperatures (55, 65, 75 °C), steam blanching times (2, 5, 8 min) and slice thickness (2, 4, 6 mm). Following optimization, it was discovered that the drying temperature, slice thickness, and steam blanching time were, respectively, 55 °C, 5.80 mm, and 4 minutes. Consequently, the generated product experiences reduced discoloration, quality loss, and reduction of bioactive components.

Keywords: Hot air drying. Purple-fleshed potato. Bioactive components. RSM.

1 Introduction

Potatoes (*Solanum tuberosum* L.), which belong to the Solanaceae family, are the fourth most popular staple food after rice, wheat, and corn [1]. The world is changing and evolving, and consumers are becoming more interested in eating healthily. At this point, potatoes respond to the demands of consumers in this regard with the nutrients (carbohydrates, dietary fibre, vitamins, and mineral content) they contain [2]. Many studies have shown that these substances are beneficial in preventing a wide range of diseases (such as cancer, heart disease, allergies, and neurological disorders) [3-5]. Moreover, they contain significant bioactives such as anthocyanins and phenolic compounds. depending on the type [6]. Especially purple-fleshed potatoes (PFP) represent a natural source of anthocyanins rich in anthocyanins in the form of acylated glycosides such as petunidin, malvidin, peonidin, and delphinine [6] and so with the ever-increasing demand for healthy foods. Purple-fleshed potatoes have attracted the attention of researchers [7] However, as noted by Tonon et al. [8] and Musilova et al. [9], anthocyanins are very

Öz

Meyve ve sebzeleri muhafaza etmek için kullanılan en popüler tekniklerden biri kurutmadır. Bir çok kurutma tekniğinin avantajı ve dezavantajı vardır. Son ürünün kalitesi, seçilen kurutma tekniğinden etkilenebilir. Bu çalışmanın amacı, yeni bir mor etli patates çeşidinin sıcak hava kurutma koşullarını, kurutma öncesi uygulanan buharda haşlama işleminin süresi, dilim kalınlığı ve kurutma sıcaklığını dikkate alarak yanıt yüzey yöntemi (RSM) ile optimize etmektir. Kurutma sonucunda elde edilen mor etli patates tozlarında farklı kurutma sıcaklıkları (55, 65, 75 °C), buharda haşlama süreleri (2, 5, 8 dk) ve dilim kalınlıkları (2, 4, 6 mm) dikkate alınarak toplam fenolik bileşik, antioksidan aktivite, kroma ve nişasta oranı gibi analizler yapılarak optimum kurutma koşulları belirlenmiştir. Optimizasyonun ardından kurutma sıcaklığı, dilim kalınlığı ve buharda haşlama süresi sırasıyla 55 °C, 5,80 mm ve 4 dakika olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, üretilen üründe daha az renk değişikliği, kalite kaybı ve biyoaktif bileşenlerde azalma görülür.

Anahtar kelimeler: Sıcak hava kurutma. Mor etli patates. Biyoaktif bileşenler. Yanıt yüzey yöntemi.

sensitive to several environmental and process factors, including temperature, light, pH, and oxygen. As a result, they degrade quickly and become unwanted, colorless brown chemicals [10]. Foods that include bioactives, such as anthocyanins, require special consideration during food processing. One of the most often used and popular methods of food preservation in the food industry is drying. In summary, the process of drying involves the evaporation of water from food materials due to heat transfer energy, usually under regulated circumstances. Drying aims to reduce the moisture percentage of fruits and vegetables from 80–95% to 10–20% by reducing water activity. Thus, the dried product becomes microbiologically, enzymatically, and chemically stable and can be stored longer. On the other hand, the drying process can have many negative effects, such as loss of nutrients, color, taste, and texture in food. The most popular technique for dehydrating food is traditional drying, which uses heated airflow to eliminate moisture from food. However, in order to minimize these negative effects, many drying techniques have been developed, and drying conditions have been optimized. The most popular technique

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: sinemcoruk@ohu.edu.tr (K.S. Coruk)

Geliş / Recieved: 26.01.2024 Kabul / Accepted: 23.02.2024 Yayınlanma / Published: 15.04.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1426028

for dehydrating food is traditional drying, which uses heated airflow to eliminate moisture from food. Hot air drying is not always the optimum drying technique, despite its low cost and ease of use [11]. Occasionally, food materials require high temperatures and time for drying, resulting in a loss of color, texture, and nutrients. Jing et al. [12] found that among the various drying processes, the hot air drying method had the lowest levels of antioxidant activity and phenolic compounds.

To achieve optimal system efficiency and dried product quality at the lowest possible cost and time is the aim of optimizing the food drying process [13-14]. Response surface methodology (RSM), a collection of statistical and mathematical techniques, is a useful tool for the creation, enhancement, and optimization of food processes [15-16]. RSM has been widely used in the optimization of drying foods with different methods including the Microwave-Conventional drying of sweet potato [17], the convective-infrared drying of turnip slices [18], the convective air drying of pumpkin seeds [19], the combined microwave-hot air drying of purple cabbage [20].

The purpose of this study was to use RSM to ascertain the hot air drying conditions of the first domestic and national variety, the purple-fleshed potato (ilk mor).

2 Materials and methods

2.1 Sample preparation

Purple-fleshed potatoes were kept at +4°C in a storage room after being provided by the Faculty of Agricultural Sciences and Technologies at Nigde Omer Halisdemir University. Purple flesh-colored potato samples were first washed and peeled. Then, according to the experimental design, the slice thicknesses and steam boiling time were determined, and the samples were dried in the hot air drying cabinet (Isotex) until the moisture value reached around 10% after steaming.

2.2 Experimental design

RSM was used to optimize drying conditions. The box-Behnken model was selected for RSM analysis. The effect of three independent process parameters: thickness (X_1 , mm), drying temperature (X_2 , T), and steam blanching time (X_3 , t) were examined using RSM. The total number of hot air-drying of purple-fleshed potato experiments was 15, and three replicates at the centre point of the design were done Center point: drying temperature; slice thickness; steam blanching time: 65 °C, 4 mm, 5 minutes, respectively (Table 2).

Minitab 17.1.0.0 was used for the experimental design, data analysis and regression modelling. The independent variables were; X_1 (2, 4 and 6 mm). X_2 (55, 65 and 75°C). and X_3 (2, 5, and 8 min). The proposed model is shown in Eq.(1).

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{11}X_{11} + b_{22}X_{22} + b_{33}X_{33} + b_{12}X_{12} + b_{13}X_{13} + b_{23}X_{23} \quad (1)$$

Table 1. Limit and level values of independent variables for hot air drying

Variables	Coding level's actual values		
	-1	0	+1
Drying temperature (°C)	55	65	75
Slice thickness (mm)	2	4	6
Steam blanching time (min)	2	5	8

Where Y was the response of the equation. Response values were included in the equation as TPC, AA, TMA, chroma, and starch ratio. b_0 was the constant coefficient. b_1 , b_2 , and b_3 were the linear coefficients. b_{11} , b_{22} and b_{33} were the quadratic coefficients. b_{13} , b_{23} and b_{12} were the interaction coefficients. The values of R^2 adjusted- R^2 and lack-of-fit of models were evaluated to check the model adequacies.

Table 2. Response surface method trial design for hot air drying application

Trial no	Drying temperature (°C)	Slice thickness (mm)	Steam blanching time (min)
1	65	2	8
2	65	6	2
3	65	4	5
4	65	6	8
5	55	6	5
6	75	4	8
7	65	2	2
8	65	4	5
9	65	4	5
10	75	4	2
11	75	2	5
12	75	6	5
13	55	2	5
14	55	4	2
15	55	4	8

2.3 Steam blanching time

One pre-treatment technique that reduces quality losses during drying is steam blanching. Consequently, the Box-Behnken model's steam blanching time of 90±2 °C was followed for this study's steam blanching procedure.

2.4 Solvent extraction

Bioactive compounds from potato powders were extracted using methanol (80 % Sigma, Germany) containing 1% HCl (Honeywell, Germany). Purple-fleshed samples were mixed with extraction solution at a dilution rate of 1g/50 mL. Samples, extracted at room temperature for 1 day were used for analysis.

2.5 Total Phenolic Content (TPC)

The TPC of the dried potato sample was determined using the Folin-Ciocalteu method [21].

2.6 Antioxidant Activity (AA)

Antioxidant activity was determined using the DPPH method with minor modifications [22].

2.7 Total Monomeric Anthocyanin (TMA) content

The total monomeric anthocyanin content of the samples was measured by the pH differential method [23].

2.8 Color

L^* , a^* and b^* values were determined using the Konica-Minolta (CR400, Osaka, Japan) colorimeter [24]. For each potato slice, readings were taken at least three different points.

2.8.1. Chroma

Chroma values were calculated using Equation (2) to determine the effect of drying on the purple-fleshed potatoes.

$$\text{Chroma} = C^* = [(a^*)^2 + (b^*)^2]^{1/2} \quad (2)$$

2.9 Determination of starch ratio

The starch ratio was measured as described previously [23]. The determined optical rotation degree was substituted in Equation (3) to calculate the starch ratio (%).

$$\% \text{ Starch} = \frac{\alpha \cdot 2000}{(a)_{20}^D \cdot L} \quad (3)$$

α : The degree of rotation read on the polarimeter

$(a)_{20}^D$: Specific degree of conversion of potato starch

L: Polarimeter tube length

2.10 Statistical analysis

The data were analysed using Minitab (Minitab 17.1.0.0, State College, PA, USA) statistical software with a 95% confidence interval and the general linear model was used in the analysis of the data. Tukey's multiple comparison test was used to determine whether there was a significant difference between the groups. Each experiment was repeated three times.

Table 3 Data on total phenolic content, antioxidant activity, chroma, total monomeric anthocyanin content and starch ratio obtained as a result of the analysis of purple-fleshed potato powders.

Trial no	Drying Temperature (°C)	Slice Thickness (mm)	Steam blanching time (min)	TPC (mg DW)	GAE/kg	Antioxidant activity (% inhibition)	Chroma	Starch Ratio (%)	TMA content
1	65	2	8	2291.50±69.57		25.19±0.47	15.90±1.53	77.26±0.80	1784.10±38.07
2	65	6	2	2840.46±54.52		27.85±0.46	14.36±0.9	82.03±2.05	1638.68±9.83
3	65	4	5	3189.94±9.62		27.31±0.02	17.29±6.49	80.21±0.07	2075.91±41.64
4	65	6	8	2416.09±48.96		26.13±0.47	13.75±0.12	73.84±0.76	1447.08±41.77
5	55	6	5	3144.30±60.45		35.17±0.41	16.96±4.58	77.75±0.80	2638.73±48.54
6	75	4	8	2786.80±7.04		27.305±0.46	13.04±1.22	71.84±0.68	1707.30±57.71
7	65	2	2	2628.47±71.38		28.189±0.45	16.75±2.63	73.84±0.76	2131.16±63.05
8	65	4	5	3243.61±21.58		27.00±0.46	16.90±2.98	80.78±2.08	1857.41±17.13
9	65	4	5	3341.80±69.24		27.27±0.46	16.95±3.65	80.11±4.6	2054.49±10.30
10	75	4	2	2612.13±46.40		27.07±0.46	9.09±2.57	76.28±0.79	1348.58±44.35
11	75	2	5	2440.83±34.56		31.34±0.44	15.53±0.56	75.79±0.786	1824.26±26.60
12	75	6	5	2768.63±68.47		29.12±0.45	9.15±0.77	74.75±1.37	1642.32±29.90
13	55	2	5	3122.52±58.72		29.75±0.44	16.11±4.01	73.13±3.12	2767.97±44.06
14	55	4	2	3259.73±49.93		28.94±0.45	16.74±0.63	72.81±1.37	2475.20±9.82
15	55	4	8	2965.22±34.71		27.12±0.63	14.92±0.97	76.28±0.79	2070.64±3.34

Table.4 Model coefficients formed by the data of total phenolic content. chroma. antioxidant activity. starch and total monomeric anthocyanin content were obtained as a result of the analysis of purple-fleshed potato powders.

Symbols	TPC (mg GAE/ kg DW)		Chroma		AA		Starch Ratio(%)		TMA content	
	Coefficients	p	Coefficients	p	Coefficients	p	Coefficients	p	Coefficients	p
β_0 Fixed	3258.5	0.000*	17.053	0.000*	27.198	0.000*	80.371	0.000*	1995.9	0.000*
β_1 Drying Temperature (T)	-235.4	0.002*	-2.239	0.000*	-0.768	0.039 *	-0.164	0.526	-428.8	0.001*
β_2 Slice Thickness (L)	85.8	0.096	-1.261	0.002*	0.475	0.147	1.043	0.007*	-142.6	0.047*
β_3 Steam blanching time (t)	-110.1	0.046*	0.084	1.00	-0.789	0.036*	-0.718	0.030*	-73.1	0.237
β_{11} T*T	-13.8	0.832	-2.178	0.001	2.462	0.002*	-3.723	0.000*	186.3	0.067
β_{22} L*L	-375.6	0.002*	-0.434	0.244	1.691	0.009*	-1.285	0.015*	36.1	0.671
β_{33} t*t	-338.7	0.003*	-1.425	0.007*	-2.048	0.004*	-2.338	0.001 *	-281.8	0.017
β_{12} T*L	76.5	0.253	-1.808	0.002*	-1.909	0.005*	-1.414	0.009*	-13.2	0.871
β_{13} T*t	117.3	0.104	1.445	0.006*	0.516	0.245	-1.979	0.002*	190.8	0.056
β_{23} L*t	-21.8	0.727	0.060	0.858	0.319	0.453	-2.905	0.000*	38.9	0.635
The Importance of the Model	0.006*		0.001*		0.005*		0.001*		0.009*	
Lack of fit	0.243		0.068		0.028		0.169		0.344	
R^2 (%)	95.71		98.00		96.25		98.38		95.09	
R^2_{adj} (%)	87.99		94.41		89.51		95.47		86.24	

3 Results and discussion

Table 3 provided an overview of the physicochemical characteristics of purple-fleshed potato powders that had been hot air-dried. These acquired data were used to carry out the optimization process. Simultaneously, each experimental data set's model coefficients for optimization were generated and displayed in Table 4 also lack of fit values is shown in Table 4. The insignificant lack of fit for TPC ($P = 0.243 > 0.05$), Chroma ($P = 0.068 > 0.05$), Starch Ratio (%) ($P = 0.169 > 0.05$), TMA content ($P = 0.344 > 0.05$) also showed that the model fit the experimental data well.

3.1 Effect of process parameters on TPC

The TPC of purple-fleshed potato powders was found in the range between 2291.50 to 3341.80 mg GAE/100 kg DW

(Table 3). RSM analysis showed that the individual effects of drying temperature and steam blanching time on TPC were found to be significant ($p \leq 0.05$) (Table 4). High drying temperature had a negative effect ($p < 0.05$) on the TPC of purple-fleshed potato powder (Table 4). As the temperature increased, the amount of total phenolic compound decreased (Figure 1). Similar results were recorded in some fruits in which the amount of phenolic compound decreased with increasing temperature [25]. Since the polyphenols have been found to be heat-sensitive compounds, applying heat treatments can significantly lower the phenolic content of foods [26]. In another study, apple peel was dried using hot air drying, and the amount of phenolic compounds increased with decreasing temperature [27]. Furthermore, steam blanching time increased the amount of phenolic compounds up to a certain point and then decreased (Figure 1). Research

has generally attempted to mitigate the adverse effects of heat treatment by pre-treatment with steaming [28]. In addition to the fact that steaming facilitates the evaporation of water from tissues, previous research has shown that inactivating polyphenol oxidase enzymes better preserve phenolic compounds [29]. However, because the high temperature broke down the phenolic compounds, the amount of phenolic compounds decreased with longer steam blanching times (Figure 1).

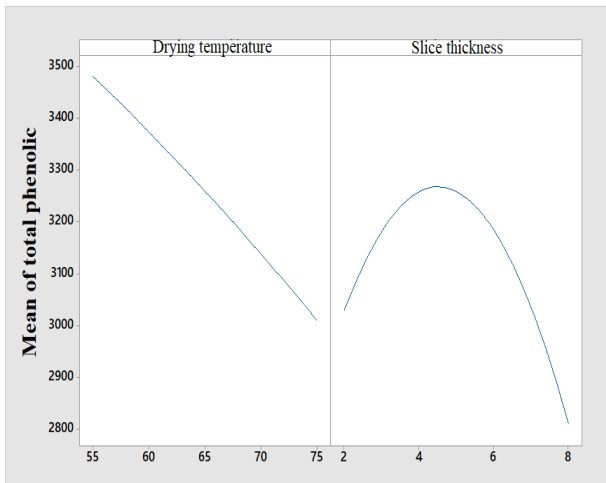


Figure 1. Effect of drying temperature and steam blanching time on the total phenolic component of the powdered purple-fleshed potato

3.2 Effect of process parameters on antioxidant activity

Antioxidant activity (inhibition %) of hot air-dried purple-fleshed potato powder was from 25.19 to 35.17 % (Table 3). Upon examining the model displaying the antioxidant activity values, it was seen that the independent variables of drying temperature and steam blanching time alone had a statistically significant influence ($p < 0.05$) and these independent variables were found to have a negative effect. (Table 4). Increasing temperature and steam blanching time decreased antioxidant activity. The results of the influence on phenolic components and the antioxidant activity value were comparable. Because phenolic compounds are in fact naturally occurring antioxidants, similar outcomes were seen [30]. Moreover, it was shown that the drying temperature and slice thickness interaction was significant ($p < 0.05$) (Table 4). Accordingly, the antioxidant activity value increased with the application of high slice thickness and a low drying temperature (Figure 2). Antioxidant activity increased due to the favourable effect of low temperature and high slice thickness on the preservation of phenolic compounds. Papoutsis et al. [31] found that the total phenolic compounds of a 5 mm-thick sliced hot air-dried sweet potato increased at 65 °C at the end of 9 hours, thus increasing the antioxidant activity. A higher level of TPC in dried foods may be observed as a result of the cellular damage that occurs during the dehydration process, which accelerates the release of phenolic chemicals.

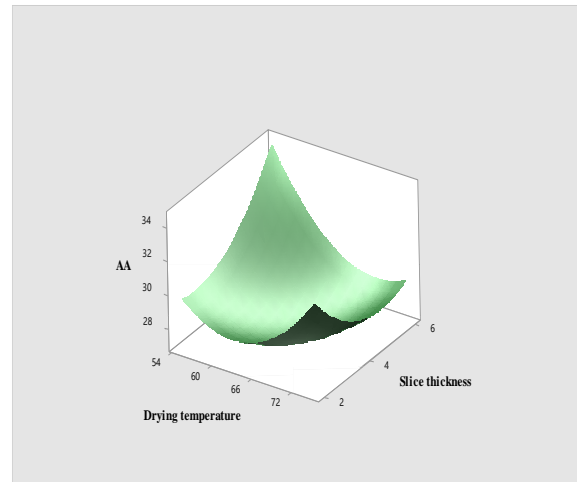


Figure 2. Effect of drying temperature and slice thickness on antioxidant activity

3.3 Effect of process parameters on starch ratio (%)

One of the primary nutrients in foods like potatoes is starch. The starch ratio of hot air-dried purple-fleshed potato powder was from 71.84 to 82.03% (Table 3). The effect of slice thickness and steam blanching time alone among the independent variables was found to be statistically significant ($p < 0.05$) when the model displaying the starch values was analyzed (Table 4). In addition to these, the interactions expressing the interactions of the treatment conditions with each other were found to be significant ($p \leq 0.05$) (Table 4). When applying low steam blanching times and high slice thicknesses, the starch value increased (Figure 3). Starch is extremely vulnerable to shear, high temperatures, amylolytic degradation, and retrogradation in its natural state. The heat treatment breaks the starch chain. According to Trancoso-Reyes et al. [32], pre-treatments with steam and microwaves could cause the crystalline region of starch to be damaged and the structure of the sweet potato flour matrix to reorganize. Therefore, a moderate steam blanching time improved the starch content. (Figure 3)

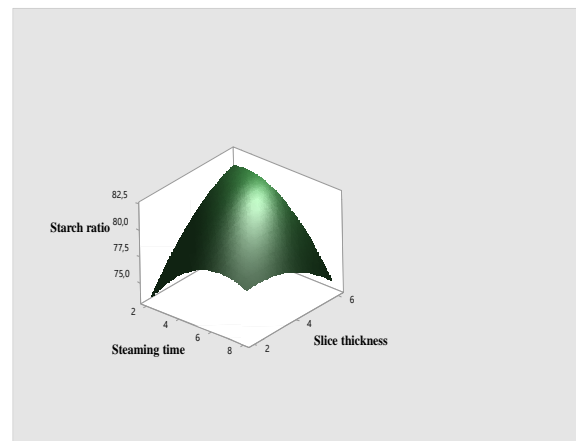


Figure 3. Effect of slice thickness and steam blanching time on starch ratio

3.4 Effect of process parameters on total monomeric anthocyanin amount

While food is drying, a lot of unstable bioactive chemicals can break down; anthocyanin is one of the most readily broken down molecules. The anthocyanin amounts of hot air-dried purple-fleshed potato powder were in the range of 1348.58 to 2767.97 mg cyanidin-3-glucoside / kg DW (Table 3). According to the RSM analysis (Table 4), linear terms of drying temperature and slice thickness were found to have a significant ($P < 0.05$) impact on TMA content. Slice thickness and drying temperature had a negative effect on anthocyanin content. The anthocyanin amount was shown to decrease with increasing drying temperature and slice thickness (Figure 4). Similarly, Liu et al. [33] reported that drying temperature has an effect on anthocyanin degradation. Studies have shown that as slice thickness increases, the amount of anthocyanins—bioactive substances that are heat-sensitive—decreases, lengthening the drying period considerably [34].

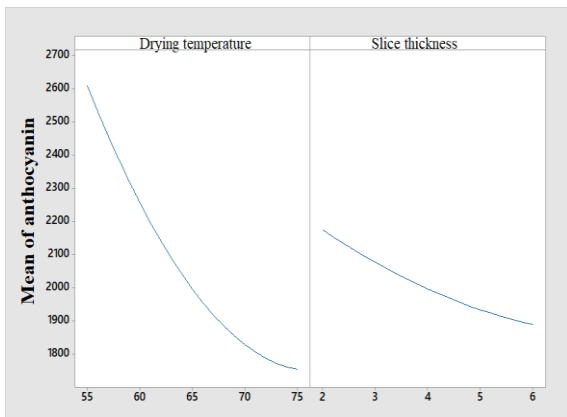
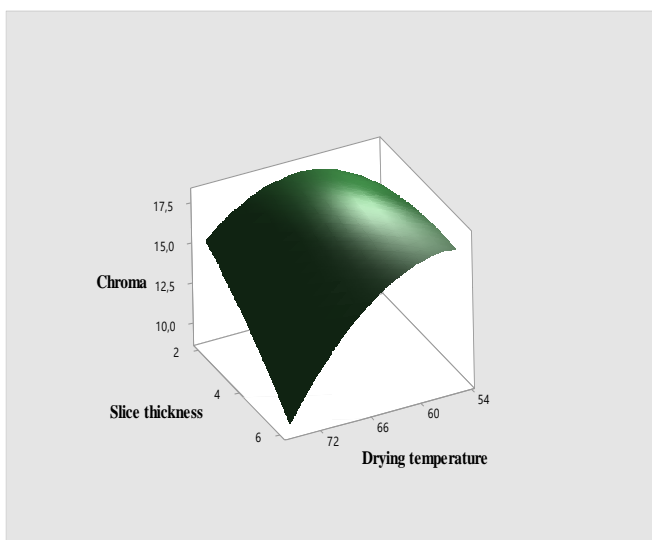


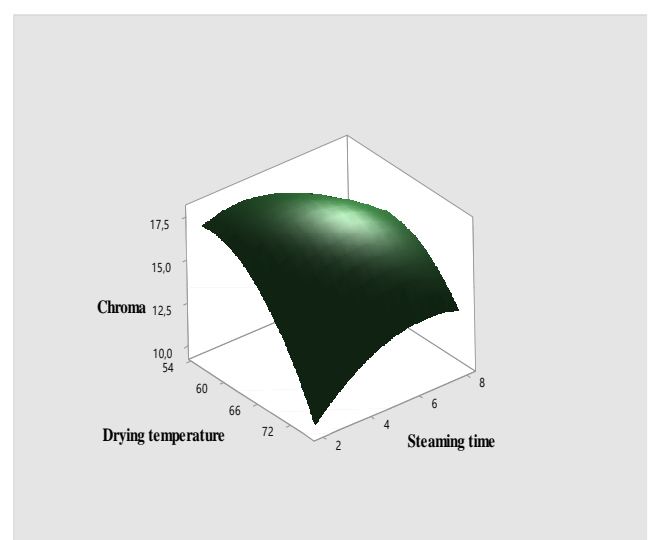
Figure 4. Effect of drying temperature and slice thickness on anthocyanin amount

3.5 Effect of process parameters on chroma

One sensory factor that has a big impact on food preference is color stability can be affected by thermal processes and process factors. The qualities of color are influenced by pretreatment and combination drying processes. The chroma value is usually an important color parameter in colored foods. Chroma value of hot air-dried purple-fleshed potato powder was from 9.09 to 17.29 (Table 3). According to the RSM analysis (Table 4), linear terms of drying temperature and slice thickness were found to have a significant ($P < 0.05$) impact on chroma value. Upon analyzing the graph depicting the correlation between drying temperature and slice thickness and the chroma value of purple-fleshed potato powder (Figure 5-a), it can be observed that a higher chroma value is achieved when low drying temperature and high slice thickness are applied. Moreover, the chroma value rose in low steam blanching time and low drying temperature application, as shown by the graph (Figure 5-b) illustrating the impact of drying temperature and steam blanching time on the chroma value of purple-fleshed potato powder. While other factors like air velocity, shape, size, and moisture content are equally effective, temperature has been proven to be the most significant component that directly affects drying kinetics in conventional drying [35]. It is thought that the decrease in thickness causes surface hardening that prevents moisture diffusion, and thus a decrease in chroma value occurs due to the need for longer drying times [34]. Extended drying periods cause certain chemical reactions, including enzymatic browning, the Maillard reaction, and caramelization, which lower L^* , a^* , and b^* values [36]. The enzyme responsible for enzymatic browning is polyphenol oxidase, therefore regarding the effect of steam blanching time, this situation was associated with the inhibition of polyphenol oxidase depending [37,38]. Savas et al. [39] reported similar results.



(a)



(b)

Figure 5. Effect of drying temperature; slice thickness(a) and steam blanching time (b) on chroma value

3.6 Determination of optimum drying conditions

The best drying conditions were selected in order to enhance the powder's quality. Total phenolic content (TPC), Antioxidant activity (AA), Total monomeric anthocyanin (TMA) content, starch ratio, and chroma values were optimized for this reason. As a result of this, Optimum hot air-drying conditions for purple-fleshed potatoes were determined as 55 °C, 5.80 mm and 4 minutes (Figure 6). The comparison of experimental and theoretical results was found to be relatively close which indicated the high reliability of the model as reported in Table 5.

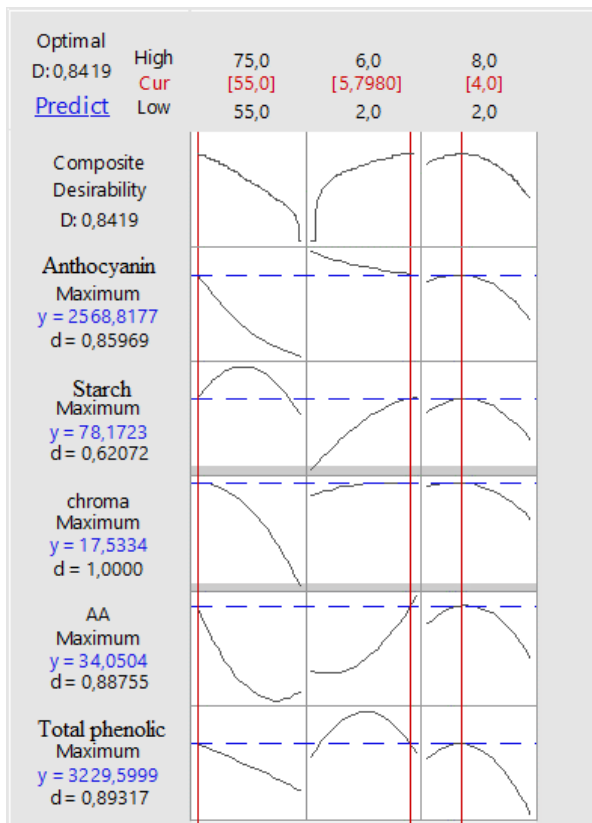


Figure 6. Hot air drying optimization graph for potatoes with purple-flesh color

Table 5. Comparison of theoretical and experimental results of optimum drying conditions

Analyses	Predicted	Experimental results	CV (%)
Total phenolic content	3229,59	3144,30±60,45	1.89
Chroma	17,53	16,39±0,06	4.75
Antioxidant activity	34,05	32,26±0,62	3.82
Starch Ratio (%)	78,17	79,23±2,86	0.95
Total monomeric anthocyanin	2568,81	2623,39±288,89	1.49

4 Conclusion

Purple-fleshed potatoes were dried in a hot air dryer under various circumstances based on an experimental design in this study. RSM was utilized to examine and maximize how hot-air dryer parameters affected the quality of the final product. The drying temperature, slice thickness, and steam blanching time were the optimized parameters. It was seen that alone and the interaction of these parameters affect the drying in different directions. To ascertain the effects of several parameters influencing the drying conditions and to combine these conditions under a single parameter, optimization with RSM proved to be a viable alternative. From the results obtained in this study, the optimum points for hot air drying conditions of purple-fleshed potatoes were found. Furthermore, even though the drying conditions had separate effects, a clear result was achieved from the optimization since these effects were assessed as a triple parameter. At the same time, it is thought that the optimization of purple-fleshed potatoes, which is a new variety made by hot air drying, provides new data to the literature.

Acknowledgements

This study was granted by the Niğde Ömer Halisdemir University Scientific Research Council (BAP) (TGT 2022/9-BAGEP).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 19%

Reference

- [1] Qiu. Gan, Y. L. Jiang and Deng. Yun, Drying characteristics, functional properties and in vitro digestion of purple potato slices dried by different methods. *Journal of Integrative Agriculture*. 18(9). 2162-2172, 2019. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62654-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62654-7)
- [2] K. Zaheer and M. Akhtar, Potato production, usage and nutrition-a review. *Journal of Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(5), 711-721, 2016. DOI: [10.1080/10408398.2012.724479](https://doi.org/10.1080/10408398.2012.724479)
- [3] H. Cory, S. Passarelli, J. Szeto, M. Tamez and J. Mattei, The role of polyphenols in human health and food systems: A mini-review. *Frontiers in Nutrition*, 5, 87, 2018. <https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00087>
- [4] Y. Zhou, J. Zheng, Y. Li, D. P. Xu, S. Li, Y. M. Chen and H. B. Li, Natural polyphenols for prevention and treatment of cancer. *Nutrients*, 8(8), 515, 2016. <https://doi.org/10.3390/nu8080515>
- [5] A. Singh, S. Holvoet and A. Mercenier, Dietary polyphenols in the prevention and treatment of allergic diseases. *Clinical & experimental allergy*, 41(10), 1346-1359, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2222.2011.03773.x>
- [6] C. Brown, Antioxidants in Potato *AJPR* 82:163–172, 2005.

- [7] J. Tian, J. Chen, F. Lv, S. Chen, J. Chen, D. Liu and X. Ye, Domestic cooking methods affect the phytochemical composition and antioxidant activity of purple-fleshed potatoes. *Food Chemistry*, 197, 1264-1270, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.11.049>
- [8] R.V. Tonon, C. Brabet and M. D. Hubinger, Anthocyanin stability and antioxidant activity of spray-dried açai (*Euterpe oleracea* Mart.) juice produced with different carrier agents. *Food Research International*, 43:907–914, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.12.013>
- [9] J. Musilova, J. Lidikova, A. Vollmannova, H. Frankova, D. Urmanska, T. Bojnanska and T. Toth, Influence of heat treatments on the content of bioactive substances and antioxidant properties of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) tubers. *Journal of Food Quality*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8856260>
- [10] A. Patras, N. P. Brunton, C. O'Donnell and B. K. Tiwari, Effect of thermal processing on anthocyanin stability in foods; mechanisms and kinetics of degradation. *Trends in Food Science & Technology*, 21(1), 3-11, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.07.004>
- [11] E. Karacabey, M. S. Bardakçı and H. Baltacıoğlu, Physical pretreatments to enhance purple-fleshed potatoes drying: effects of blanching ohmic heating and ultrasound pretreatments on quality attributes. *Potato Research*, 1-26, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11540-023-09618-8>
- [12] Y. Jing, J. F. Chen, Y. Y. Zhao and L. C. Mao, Effects of drying processes on the antioxidant properties in sweet potatoes. *Agricultural Sciences in China*, 9(10), 1522-1529, 2010. [https://doi.org/10.1016/S1671-2927\(09\)60246-7](https://doi.org/10.1016/S1671-2927(09)60246-7)
- [13] M. Yolmeh and S. M. Jafari, Applications of response surface methodology in the food industry processes. *Food and Bioprocess Technology*, 10(3), 413-433, 2017. <https://DOI10.1007/s11947-016-1855-2>
- [14] M. Amiripour, M. B. Habibi-Najafi, M. Mohebbi and B. Emadi, Optimization of osmo-vacuum drying of pear (*Pyrus communis* L.) using response surface methodology. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 9, 269-280, 2015. <https://DOI10.1007/s11694-015-9232-9>
- [15] Z. Šumić, A. Vakula, A. Tepić, J. Čakarević, J. Vitas and B. Pavlić, Modeling and optimization of red currants vacuum drying process by response surface methodology (RSM). *Food Chemistry*, 203, 465-475, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.02.109>
- [16] A. O. Omolola, A. I. O. Jideani, P. F. Kapila and V. A. Jideani, Optimization of microwave drying conditions of two banana varieties using response surface methodology. *Food Science and Technology*, 35, 438-444, 2015. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.6700>
- [17] S. Tufekci and S. G. Özkal, The Optimization of hybrid (microwave-conventional) drying of sweet potato using response surface methodology (RSM). *Foods*, 12(16), 3003, 2023. <https://doi.org/10.3390/foods12163003>
- [18] E. Taghinezhad, M. Kaveh and A. Szumny, Optimization and prediction of the drying and quality of turnip slices by convective-infrared dryer under various pretreatments by RSM and ANFIS methods. *Foods*, 10(2), 284, 2021. <https://doi.org/10.3390/foods10020284>
- [19] D. Zalazar-Garcia, M. C. Román, A. Fernandez, D. Asensio, X. Zhang, M. P. Fabiani and G. Mazza, Exergy, and sustainability assessments applied to RSM optimization of integrated convective air-drying with pretreatments to improve the nutritional quality of pumpkin seeds. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 49, 101763, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101763>
- [20] J. Liu, X. Li, Y. Yang, H. Wei, L. Xue, M. Zhao and J. Cai, Optimization of combined microwave and hot air drying technology for purple cabbage by Response Surface Methodology (RSM). *Food Science & Nutrition*, 9(8), 4568-4577, 2021. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2444>
- [21] H. Baltacıoğlu, C. Baltacıoğlu, I. Okur, A. Tanrıvermiş and M. Yalıcı, Optimization of microwave-assisted extraction of phenolic compounds from tomato: characterization by FTIR and HPLC and comparison with conventional solvent extraction. *Vibrational Spectroscopy*, 113, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2020.103204>
- [22] E. Horuz, H. Bozkurt, H. Karataş, M. Maskan, Comparison of quality, bioactive compounds, textural and sensorial properties of hybrid and convection-dried apricots. *Journal of Food Measurement Characterization*, 12:243–256, 2018. <https://doi.org/10.1007/S11694-017-9635-X/TABLES/6>
- [23] K.S. Coruk, H. Baltacıoğlu, Determination of the effect of different drying methods on the physicochemical properties of potato powder using multivariate analysis. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 10(7), 1300–1307, 2022. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v10i7.1300-1307.524>
- [24] E. Horuz, H. Bozkurt, H. Karataş, M. Maskan, Effects of hybrid (microwave-convective) and convective drying on drying kinetics, total phenolics, antioxidant capacity, vitamin C, color and rehydration capacity of sour cherries. *Food Chemistry*, 230:295–305, 2017. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2017.03.046>
- [25] K. Ghafoor, I. A. M. Ahmed, S. Doğu, N. Uslu, G. J. Fadimu, F. Al Juhaimi and M. M. Ozcan, The effect of heating temperature on total phenolic content, antioxidant activity, and phenolic compounds of plum and mahaleb fruits. *International Journal of Food Engineering*, 15(11-12), 20170302, 2019. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2017-0302>
- [26] R. P. Guiné, M. J. Barroca, F. J. Gonçalves, M. Alves, S. Oliveira and P. M. Correia, Effect of drying on total phenolic compounds, antioxidant activity, and kinetics decay in pears. *International Journal of Fruit Science*,

- 15(2), 173-186, 2015. <https://doi.org/10.1080/15538362.2015.1017073>
- [27] Q. Ma, J. Bi, J. Yi, X. Wu, X. Li and Y. Zhao, Stability of phenolic compounds and drying characteristics of apple peel as affected by three drying treatments. *Food Science and Human Wellness*, 10(2), 174-182, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2021.02.006>
- [28] H.W. Xiao, Z. Pan, L. Z. Deng, H. M. El-Mashad, X. H. Yang, A. S. Mujumdar, Z.J. Gaoand, Q. Zhang, Recent developments and trends in thermal blanching– A comprehensive review. *Information Processing in Agriculture*, 4(2), 101- 127, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.02.001>
- [29] A. Sarkar, S. Rahman, M. Roy, M. Alam, M. A. Hossain and T. Ahmed, Impact of blanching pretreatment on physicochemical properties, and drying characteristics of cabbage (*Brassica oleracea*). *Food Research*, 5(2), 393-400, 2021. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.5\(2\).556](https://doi.org/10.26656/fr.2017.5(2).556)
- [30] S. C. Santos, G. A. Fortes, L. T. Camargo, A. J. Camargo and P. H. Ferri, Antioxidant effects of polyphenolic compounds and structure-activity relationship predicted by multivariate regression tree. *LWT*, 137, 110366, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110366>
- [31] K. Papoutsis, P. Pristijono, J. B. Golding, C. E. Stathopoulos, M. C. Bowyer, C. J. Scarlett and Q. V. Vuong, Effect of vacuum-drying, hot air-drying and freeze-drying on polyphenols and antioxidant capacity of lemon (*Citrus limon*) pomace aqueous extracts. *International Journal of Food Science & Technology*, 52(4), 880-887 2017. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13351>
- [32] N. Trancoso-Reyes, L.A. Ochoa-Martinez, L.A. Bello-Perez, J. Morales-Castro, R. Estevez-Santiago and B. Olmedilla-Alonso, Effect of pre-treatment on physicochemical and structural properties, and the bioaccessibility of β -carotene in sweet potato flour. *Food Chemistry*, 200, 199-205, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.01.047>
- [33] Y. Liu, Y. Liu, C. Tao, M. Liu, Y. Pan and Z. Lv, Effect of temperature and pH on stability of anthocyanin obtained from blueberry. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12, 1744-1753, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11694-018-9789-1>
- [34] M. T. Afolabi, A. G. Black and T. K. Adekunbi, The influence of drying on the physical properties of sweet potato slices. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 18(1), 301-313, 2016.
- [35] I. Doymaz, Drying Behavior and Some Quality Parameters of Potato Finger Chips Using Infrared Radiation. *Latin American Applied Research-An international journal*, 51(4), 261-267, 2021. <https://doi.org/10.52292/j.laar.2021.779>
- [36] S. S. J. Senevirathna, N. S. Ramli, E. M. Azman, N. H. Juhari and R. Karim, Optimization of the drum drying parameters and citric acid level to produce purple sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) powder using response surface methodology. *Foods*, 10(6), 1378, 2021. <https://doi.org/10.5390/foods10061378>
- [37] H. Baltacıoğlu and K. S. Coruk, Determination of conformational changes of polyphenol oxidase and peroxidase in peach juice during mild heat treatment using FTIR spectroscopy coupled with chemometrics. *International Journal of Food Science & Technology*, 56(6), 2915-2925, 2021. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14930>
- [38] K. Ruttarattanamongkol, S. Chittrakorn, M. Weerawatanakorn and N. Dangpium, Effect of drying conditions on properties, pigments and antioxidant activity retentions of pretreated orange and purple-fleshed sweet potato flours. *Journal of Food Science and Technology*, 53, 1811-1822, 2016. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-2086-7>
- [39] E. Savas, The modelling of convective drying variables' effects on the functional properties of sliced sweet potatoes. *Foods*, 11(5), 7K, 2022. <https://doi.org/10.3390/foods11050741>





Bakır-Gümüş (Cu-Ag) faz sistemi termodinamik veri analizi ve optimizasyonu

Thermodynamic data analysis and optimization of the Copper-Silver (Cu-Ag) phase system

Muhsin İder^{1,*} 

¹ Uşak Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 64200, Uşak Türkiye

Öz

Bakır-Gümüş (Cu-Ag) termodinamik veri tabanı Calculation of Phase Diagram (CALPHAD) metodu kullanılarak en son deneysel verilerin kıyaslamalı analizi ile optimize edilmiştir. Gümüşçe zengin katı fazında maksimum bakır çözünürlüğü mol kesri olarak 0.095 bulunmuştur. Bakır zengin katı fazında maksimum gümüş çözünürlüğü mol kesri olarak 0.046 hesaplanmıştır. Rastlantısal karışım teorisi katı yüzey merkezli kübik fazı ve sıvı fazı Gibbs enerjilerini modellemek için kullanılmıştır. En güncel deneysel bakır aktivitesi değerleri ve karışma entalpisi verileri optimizasyon prosesinde dikkate alınmıştır. Optimize edilen veri tabanından ötektik sıcaklığı 1052.3 Kelvin olan karakteristik bir ötektik Cu-Ag faz diyagramı hesaplanmıştır. Bu kıyaslamalı veri analizi çalışmasından elde edilen termodinamik özellikler ve hesaplanan faz diyagramı en son deneysel verilerle önceki optimizasyon çalışmalarından daha uyumlu bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Cu-Ag faz diyagramı, Termodinamik veri optimizasyonu, Termodinamik veri analizi, Faz diyagramı

1 Giriş

Gümüş (Ag) ve bakır (Cu) saf halde yumuşak fazda metallendir. Bazı diğer elementlerle yapılan karışımları ile işlenebilirlik özellikleri ayarlanabilen alaşımlar çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Buna örnek olarak som gümüş ve kalay (Sn) da eklenerek yapılan alaşımların elektronik kurşunsuz lehim malzemesi olarak kullanımı verilebilir. Ayrıca paladyumlu bakır gümüş alaşımların daha iyi sıcaklık dayanımı göstermesi nedeniyle baskılı devre kartlarında elektrik bağlantısı olarak kullanma potansiyeli bulunmaktadır.

Bakır (Cu), İndiyum (In), Galyum (Ga) ve Selenyum (Se) elementlerinden foton absorplayıcı tabaka üretiminde bakır atomlarının kristal kafeste gümüş ile yer değiştirmesi bant aralıklarını değiştirmektedir [1-3]. CuIn_xSe₂ (CIS) ve CuGaSe₂ (CGS) stokiometrik olmayan bileşikler olup stokiometrik bölgede sıcaklıkla lineer olmayan değişken homojenlik aralıkları göstermektedir. Buna sebep olarak farklı aktivasyon enerjilerine sahip kafes yapısal defekt (defect) mekanizmaları öne sürülmektedir. CuIn_xGa_{1-x}Se₂ (CIGS) ise bu iki yarı iletken bileşiğin katı çözeltilisidir. Ag eklenmiş CIGS ve onun alt sistemlerinden olan Cu-Ag

Abstract

The Copper-Silver (Cu-Ag) thermodynamic database was assessed by employing the Calculation of Phase Diagram (CALPHAD) method with a critical analysis of the latest experimental data. The maximum solubility of copper in the crystalline silver-rich phase was found to be a 0.095-mole fraction. The maximum silver solubility in the solid copper-rich phase was calculated as a 0.046-mole fraction. Random mixing theory was used to model the Gibbs energies of the solid face-centered cubic and liquid phases. The most recent experimental values for copper activity and mixing enthalpy data were considered in the optimization process. A characteristic eutectic Cu-Ag phase diagram with a eutectic temperature of 1052.3 Kelvin was calculated from the optimized database. The thermodynamic properties obtained from the current assessment and calculated phase diagram were found to be more consistent with recent experimental data than previous optimizations.

Keywords: Cu-Ag phase diagram, Thermodynamic data optimization, Thermodynamic data assessment, Phase diagram

sistemini termodinamik fonksiyonları, termokimyasal özellikleri ile faz diyagramlarının hesaplanması kritik öneme sahiptir. Hâlihazırda CIGS bileşik reaksiyon yolu karmaşıktır ve CIGS' e Ag eklenmesi daha da zor ve fazla parametre optimizasyonuna ihtiyaç göstermektedir.

Termodinamik verileri optimize edilmiş Cu-Ag-In-Ga-Se sistemini ve alt sistemlerini tam olarak hesaplayarak ilgili parametreleri üretmek denge şartları ve en verimli reaksiyon/sentez yolunun keşfedilmesinde yardımcı olacaktır. Bu çalışmada Cu-Ag ikili yarı iletken sistemi faz diyagramı hesaplanmış ve termodinamik verileri bütüncül sistemle uyumlu olacak şekilde optimize edilmiştir. Termodinamik veri tabanı ve hesaplanan termodinamik özellikler arasında iyi bir uyum bulunmuştur

2 Materyal ve metod

2.1 Faz diyagramı literatür verileri

Deneysel literatür verileri incelendiğinde Cu-Ag sisteminin faz diyagramının klasik bir ötektik diyagram şeklinde olduğu anlaşılmaktadır. Sıvı karışımın tek fazdan oluştuğu hakkında genel bir görüş birliği bulunmaktadır. Bu çalışmada yapılan faz diyagramı hesaplamasında gümüş katı

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: muhsin.ider@usak.edu.tr (M. İder)

Geliş / Received: 27.02.2023 Kabul / Accepted: 26.02.2024 Yayınlanma / Published: 15.04.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1257151

fazında maksimum bakır çözünürlüğü mol kesri olarak 0.095 ve bakır katı fazında gümüş maksimum çözünürlüğü mol kesri olarak 0.047 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanmış faz diyagramı Şekil 1'de çizilmiştir. Termodinamik kıyaslamayla seçilmiş bazı faz diyagramı verileri [4-6] ile hesaplanan diyagram Şekil 2'de sunulmaktadır. Şekil 3'te de gümüşçe zengin konsantrasyonlardaki bazı seçilmiş deneysel veriler gösterilmektedir.

Cu-Ag sisteminin sıvı fazı 1875 yılından itibaren pek çok defa [4], [7-15] çalışılmıştır. DTA, EMF, pirometri gibi çeşitli deneysel yöntemler kullanılan çalışmalarla çeşitli ölçümler yapılmış ve karışmazlık aralığı bildirilmemiştir. Bu ölçümlerden Heycock [7] tarafından sunulan deneysel veriler genel kabul görmüştür. Bunun nedeni bu verilerin Rosina [4], [13] tarafından yüksek saflık metal ve düşük oksijen kontaminasyonu deneyleri ile doğrulanmış olmasıdır. Detaylı deneysel literatür verileri Subramanian [4] tarafından derlenmiştir.

Ötektik nokta sıcaklığı için bulunan en son verilerden biri 1053 Kelvin (K) olarak Bienzle [6] tarafından rapor edilmiştir. Fakat bundan önce ötektik sıcaklığı için yapılan birkaç çalışmada [7-9], [16-18] çeşitli yöntemlerle 1050.15 K sıcaklığından 1053 K'e [4] değişen ölçümler bildirilmiştir. Bienzle [6] tarafından bulunan değer ekstrapolasyona dayanmaktadır. Buna ek olarak Moser [18] yüksek saflıkta metal kullanarak hassas ölçüm yapmıştır. Bu optimizasyon çalışmasında Subramanian [4] tarafından da tavsiye edildiği üzere Moser [18] tarafından bulunan 1052.1 ±0,08 K değeri ötektik sıcaklık için optimizasyon başlangıç değeri kabul edilmiştir. Ötektik noktanın bileşimi için Subramanian [4] literatürdeki deneysel sonuçların tümünün 0.398 ile 0.410 Cu arasında mol kesri aralığında değiştiğini rapor etmiştir. Bu çalışmada ise Hansen [19] tarafından rapor edilen 0.399 ±0.002 kompozisyon başlangıç değeri olarak kullanılmıştır.

Bahari [20] Tamman grafiğini kullanarak Cu-Ag sistemini yeniden araştırmıştır. Subramanian [4] tarafından yapılan karşılaştırmalı veri analizinden elde edilen değerler ile uyumlu sonuçlar bulunmuştur.

Cu-Ag sisteminin katılaşma ve sıvılaşma eğrisi birçok grup tarafından rapor edilmiştir [8-10], [12], [13], [15], [17], [21-25]. Bu çalışmalarda herhangi bir intermetalik bileşik rapor edilmemiştir. Elliott [23] tarafından bu alandaki karşılaştırmalı analize göre seçilmiş veriler derlenmiştir.

Bakırca zengin faz diyagramı kompozisyonlarındaki deneysel veriler genel olarak birbiri ile uyumludur. Fakat faz diyagramının gümüş (Ag) kompozisyonunca zengin tarafındaki literatür verilerinde belirgin bir saçılma görülmektedir.

En son katı ile katı+sıvı fazları arasındaki sınır çizgisi (solidus) ve katı ile katı1+katı2 fazları arasındaki sınır çizgisi (solvus) eğrilerine ait veriler Bienzle [6] tarafından rapor edilmiştir. Fakat rapor edilen değerler EMF ölçüm değerinin sıfıra ekstrapolasyonu ile yapılan bir ekstrapolasyonla bulunmuştur. Bu veriler bu optimizasyon çalışmasında başlangıç verisi olarak dâhil edilmiştir fakat etki yüzdesi düşük olarak kullanılmıştır.

Benzer olarak Witusiewicz [5] katılaşma ve sıvılaşma eğrisine ait bir veri setini Sommer [26] tarafından yapılan ölçümlere dayandırarak rapor etmiştir. Ancak bu veriler

deneysel yöntem ve koşullar ile ilgili detay eksikliğinden dolayı mevcut optimizasyon çalışmasında kullanılmamıştır.

2.2 Termodinamik özellikler

Cu-Ag sisteminin katı fazlarına ait termodinamik özellik ölçümleri konusunda çeşitli araştırmalar yapılmıştır [12], [27], [28]. Bu konudaki 1990' dan önce ölçülmüş veriler Subramanian [4] tarafından derlenmiştir. Bu özetlenmiş verilere ek olarak, Bienzle [6] tarafından gümüş zengin kompozisyon bölgesine ait EMF ile yapılmış Cu aktivite ölçümü ve bağlantılı termodinamik ölçüm verileri bulunmaktadır. Bu çalışmada, Subramanian [4] tarafından bulunan 1052 K sıcaklığındaki katı fazda karışma entalpisi değeri kullanılmıştır. Bunun nedeni bu verinin önceki deneysel sonuçlar [12] ile uyum göstermesidir. Buna ek olarak Bienzle [6]' ye ait 1053 K sıcaklıkta katı faz karışma entalpisi ve çeşitli sıcaklıklarda katı fazda Cu aktivite ölçüm verileri de bu optimizasyonda kullanılmıştır.

Subramanian [4] sıvı fazdaki termodinamik özellikleri derleyerek özetlemiştir ve bazı veri ölçümlerini tekrarlamıştır. Önceki çalışmalarda [29-35] yayınlanan sonuçlar ile aynı sonuçları elde edilmiştir. Daha sonra Fitzner [36] tarafından Cu-Ag sisteminin sıvı faz karışım entalpisi yerinde karışım (in-situ mixing) yöntemiyle 1375 ±2 K' de tekrar belirlenmiştir.

2.3 Termodinamik model

Mevcut çalışmadan önce birkaç grup tarafından Cu-Ag sisteminin termodinamik veri tabanı [5], [37-41] kıyaslamalı analizle derlenmiştir. Literatür verilerinin kıyaslamasında Murray [37], Lim [39] ve Kusoffsky [40]' ye ait verilerin diğer bazı deneysel verilerden [4], [5] sapma gösterdiği anlaşılmaktadır.

Mevcut durumda Hayes [38] tarafından rapor edilen veriler termodinamik optimizasyon hesaplamalarında genel kabul görmüştür ve diğer hesaplamalarda ve karşılaştırmalarda yaygın referans olarak kullanılmaktadır. Buna rağmen Hayes [38] tarafından yapılan hesaplamalar sonucu bulunan veriler Bienzle [6] ve Fitzner [36]' e ait deneysel veriler ile belirgin ayrılıklar göstermektedir.

Ayrıca Fitzner [36]' in termodinamik sonuçları ile Witusiewicz [5] ve He [41] tarafından bulunan sonuçlar uyum göstermektedir fakat bu hesaplanan veriler Bienzle [6] tarafından rapor edilen deneysel verilerle uyumlu değildir. Bu nedenle bu çalışmada detaylı bir karşılaştırmalı veri analizi ve derlemesine bağlı faz diyagram hesaplaması ve optimizasyonu yapılmıştır.

2.4 Saf elementler

Saf Ag ve Cu elementlerine ait Gibbs enerji verileri en son Dinsdale [42] tarafından yapılan kıyaslamalı derlemeden alınmıştır. Denge hesaplamalarında kullanılan Gibbs enerjisi denklemleri için aşağıdaki model kullanılmıştır.

$${}^0G - H^{SER} = a + b \cdot T + c \cdot T \cdot \ln T + d \cdot T^2 + e \cdot T^{-1} + f \cdot T^3 + g \cdot T^7 + h \cdot T^{-9} \quad (1)$$

Burada G, ⁰G, H, SER, a-h ve T sırasıyla Gibbs enerjisini, standart elemental referans durumunu, entalpiyi, standart elemental referans şartları olan 298.15 Kelvin (K) sıcaklığını

ve 1 bar basıncını, model katsayılarını ve mutlak sıcaklığı temsil etmektedir. Burada H^{SER} parametresi saf haldeki elementin 298.15 K ve 1 bar şartlarındaki kararlı yapısına ait entalpi değeridir.

2.5 Sıvı ve katı faz

Literatürdeki kapsamlı deneylere ait çeşitli raporlarda sıvıda karışmazlık aralığı bildirilmemiştir. Katı fazda stokiometrik bileşik rapor edilmemiştir. Bu çalışmada, Cu-Ag sisteminin sıvı fazı ve katı yüzey merkezli kübik (α -fcc) fazı Bragg-Williams gelişigüzel karışım modeli ile tanımlanmıştır. Bu karışım fazlarına ait genel Gibbs enerji denklemleri aşağıdaki formda modellenmiştir.

$$G^\varphi = x_A \cdot {}^oG_A^\varphi + x_B \cdot {}^oG_B^\varphi + R \cdot T \cdot [x_A \cdot \ln(x_A) + x_B \cdot \ln(x_B)] + {}^{XS}G^\varphi \quad (2)$$

Burada φ tanımlanan fazı ifade ederken, x elementin mol kesri anlamına gelir ve A, B bileşenleri temsil eder. G_A, G_B ise A ve B elementlerinin φ fazındaki Gibbs enerjileridir. ${}^{XS}G^\varphi$ ise fazlalık Gibbs enerjisi olup Redlich-Kister polinom açılımı ile genel olarak aşağıdaki genel formül ile ifade edilmektedir.

$${}^{XS}G^\varphi = x_A \cdot x_B \cdot \sum_{v=0}^n {}^vL_{A,B}^\varphi (x_A - x_B)^v \quad (3)$$

Burada v sıfırdan başlayan tam sayılardır. ${}^vL_{A,B}^\varphi$ ise A-B ikili sisteminde φ fazı için etkileşim katsayısını ifade eder. Mevcut çalışmada bu etkileşim katsayısının sıcaklıkla lineer değiştiği aşağıdaki iki katsayılı model kullanılmıştır

$${}^vL_{A,B}^\varphi = a_v^\varphi + b_v^\varphi \cdot T \quad (4)$$

Burada a ve b optimizasyon yazılımı ile hesaplanan her φ fazına özel katsayılardır. Katsayı v değeri ise optimizasyon verilerinin dağılımına göre matematiksel olarak bulunmaktadır. Bu modele göre hesaplanmış katsayılar **Tablo 1**'de verilmiştir.

Tablo 1. Ag-Cu sisteminin optimize edilmiş termodinamik model parametreleri

Tanımlanan Faz	Termodinamik Parametre
α -fcc	${}^0L_{Ag,Cu}^{\alpha-fcc} = 26579 - 3.3516 \cdot T$
	${}^1L_{Ag,Cu}^{\alpha-fcc} = -9626.37 + 7.7262 \cdot T$
	${}^2L_{Ag,Cu}^{\alpha-fcc} = 7380.9$
Sıvı	${}^0L_{Ag,Cu}^{Sıvı} = 14144.1 - 0.3690 \cdot T$
	${}^1L_{Ag,Cu}^{Sıvı} = -1381.51 - 1.4017 \cdot T$
	${}^2L_{Ag,Cu}^{Sıvı} = 1462.21$

Bu çalışmada Cu-Ag sistemine özel olarak minimum ortak tanjant bulma metodu ile çalışan bir program yazılmıştır. Katı halde 1052.25 K sıcaklığa kadar stabil olan α -fcc iki ayrı faz olarak modellendiğinde optimizasyonla

mükemmel uyum gösteren faz diyagramı hesaplanmıştır. Bu programda fcc1 fazı Ag zengin bölge için tanımlanırken fcc2 fazı ise Cu zengin tarafta aşağıdaki formda modellenmiştir.

$$G^\varphi = x_A \cdot {}^oG_A^\varphi + x_B \cdot {}^oG_B^\varphi + R \cdot T \cdot [x_A \cdot \ln(x_A) + x_B \cdot \ln(x_B)] + x_A \cdot x_B \cdot \Omega^\varphi \quad (5)$$

Burada φ sembolü fcc1 ve fcc2 fazlarını temsil etmektedir. Omega (Ω) ise sadece sıcaklığa (T) bağlı olarak aşağıdaki formüle göre modellendirilmiştir.

$$\Omega^\varphi = k \cdot T^2 + l \cdot T + m^\varphi \quad (6)$$

Burada k, l, m katsayılar olup T Kelvin biriminde sıcaklıktır. Katı fazlara ait ortak tanjant programından hesaplanan model parametrelerinin ötektik üçlü nokta sıcaklığın üzerinde extrapolasyonu ile faz diyagramının üst kısmı ortak tanjant programı ile yeniden hesaplanmıştır. Sıvı faz ötektik nokta etrafında ayrışan iki ayrı sıvı olarak modellendiğinde hâlihazırda optimize edilmiş faz diyagramına uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Sıvı faz aşağıdaki formda modellenmiştir.

$$G^\varphi = x_A \cdot {}^oG_A^\varphi + x_B \cdot {}^oG_B^\varphi + R \cdot T \cdot [x_A \cdot \ln(x_A) + x_B \cdot \ln(x_B)] + x_A \cdot x_B \cdot \Omega^\varphi \quad (7)$$

Burada φ sembolü sıvı1 ve sıvı2 fazlarını temsil etmektedir. Omega (Ω) ise sadece sıcaklığa (T) bağlı olarak aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır.

$$\Omega^\varphi = p^\varphi \cdot T + r^\varphi \quad (8)$$

Burada p ve r katsayılar olup T Kelvin biriminde sıcaklıktır. Faz diyagramında sıvı1 Ag zengin bölgenin ötektik kompozisyona kadar olan bölgeyi temsil etmektedir. Sıvı2 ise ötektik noktadan sonraki Cu zengin kompozisyonlardaki sıvı faz için kullanılmıştır. G_A, G_B ise A ve B elementlerinin sıvı fazlarındaki Gibbs enerjileridir. Minimum ortak tanjant programı ile bulunan model parametreleri **Tablo 2**'de verilmektedir.

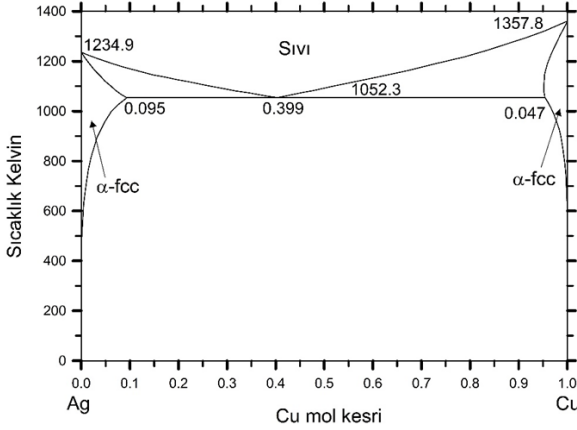
Tablo 2. Ag-Cu sisteminde minimum ortak tanjant programı model parametreleri

Tanımlanan Faz	Termodinamik Parametre ($\Omega^\varphi = k^\varphi \cdot T^2 + l^\varphi \cdot T + m^\varphi$)
fcc1	$k^{fcc1} = -0.070744, l^{fcc1} = 118.6553, m^{fcc1} = -22421.81$
fcc2	$k^{fcc2} = -0.091867, l^{fcc2} = 142.7394, m^{fcc2} = -21293.41$
Tanımlanan Faz	Termodinamik Parametre ($\Omega^\varphi = p^\varphi \cdot T + r^\varphi$)
Sıvı1	$p^{Sıvı1} = -38.7982, r^{Sıvı1} = 49591.01$
Sıvı2	$p^{Sıvı2} = -135.6632, r^{Sıvı2} = 142816.06$

Ortak tanjant ile hesaplanan faz diyagramı genel olarak PANDAT 8.1 yazılımıyla yapılan optimizasyonla uyum göstermiştir. Fakat literatürde Cu-Ag için sıvı ve katı fazlarda tek faz tanımlı model genel olarak kabul edildiğinden bu çalışmada sadece PANDAT 8.1 yazılımı ile elde edilen tek katı tek sıvı faz modeli optimizasyonuna ait faz diyagramı sunulmaktadır.

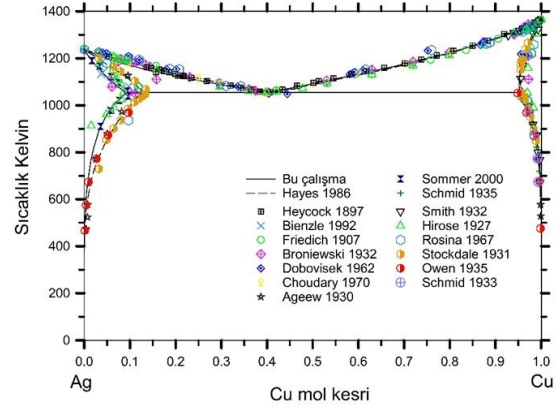
3 Bulgular ve tartışma

İkili Cu-Ag ikili sisteminin termodinamik parametreleri PANDAT 8.1 yazılımıyla optimize edilmiştir. Faz dengesine ait deneysel veriler ile sıvı fazdaki karışım entalpisi ve molar aktivite, çeşitli sıcaklıklarda bileşen aktivitesi ve katı fazda gümüşçe zengin taraftaki karışım entalpisine ait tüm veriler optimizasyonda kullanılmıştır. Optimizasyon hesaplamalarına Ag-solvus verileri EMF değerlerinin sıfıra projeksiyonu ile elde edildiğinden dâhil edilmemiştir. Bu çalışmada optimize edilmiş veri tabanı kullanarak hesaplanan diyagram Şekil 1'de gösterilmiştir.

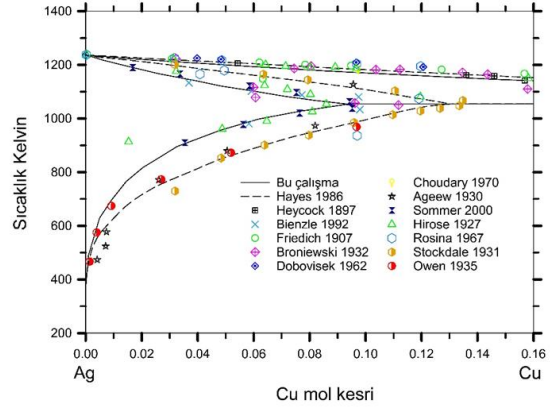


Şekil 1. CALPHAD metodu ile optimize edilmiş Cu-Ag faz diyagramı

Şekil 2'de ise optimizasyon sonucu hesaplanan faz diyagramı ile literatürde ölçülmüş faz dengelerine ait derlenmiş veriler bir arada gösterilmektedir. Cu kompozisyonunun 0 ila 0.11 mol kesri aralığındaki dar kesimine ait faz diyagramı büyütülmüş olarak Şekil 3'te çizilmiştir. Optimize edilmiş termodinamik parametreler Tablo 1'de özetlenmiştir. Hesaplanan faz diyagramı genel olarak deneysel faz denge verileri ile iyi bir uyum göstermiştir. Ancak Şekil 3'te görüldüğü üzere, α-fcc fazındaki Ag bakımından zengin tarafta, katılma ve solvus eğrileri deneysel verilerden bir miktar sapmaktadır. Buradaki kompozisyon-sıcaklık verileri Bienzle [6] tarafından önerilen verilerin extrapole edilmiş değerleridir. Solvus için yapılan ekstrapolasyonda Ag içindeki Cu miktarının ihmal edilecek kadar küçük olduğu kabulü ile bu ekstrapolasyon yapıldığından doğruluk ihtimali az olarak kabul edilmiştir. Bu nedenle bu verilerin nispeten daha düşük doğruluğa sahip olduğu kabul edilebilir ve dilatometrik ölçümler, DTA vb. gibi başka yöntemlerle ileride yeniden doğrulanması gerekebilir.



Şekil 2. Hesaplanan faz diyagramı ile derlenmiş deneysel verilerin karşılaştırılması. Sıyah düz çizgi bu optimizasyon çalışmasıdır.



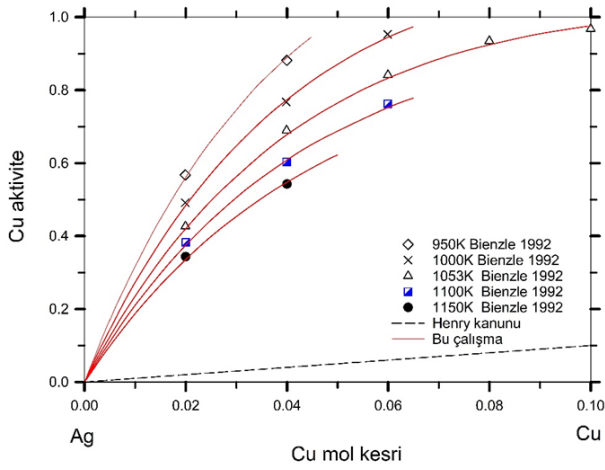
Şekil 3. Hesaplanmış faz diyagramının Ag zengin bölgedeki deneysel noktalar ile karşılaştırılması. Sıyah düz çizgi bu optimizasyon çalışmasıdır.

Tablo 3' de Cu-Ag sisteminde hesaplanarak bulunmuş veya deneysel olarak ölçülmüş erime noktaları ve ötektik reaksiyon ve maksimum çözünürlük değerlerine ait özel veri noktaları derlenmiştir.

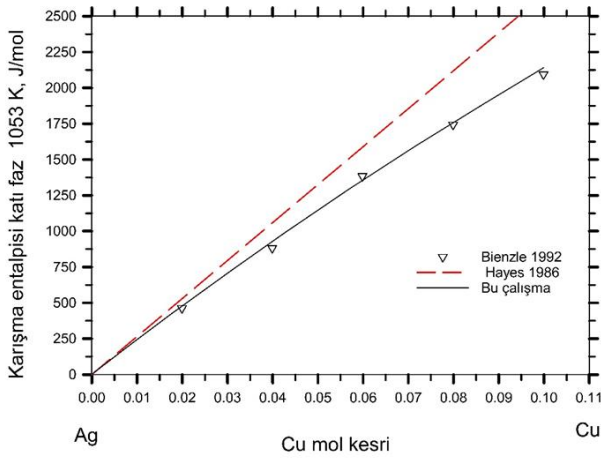
Bu çalışmada hesaplanan bu noktaların çoğunun deneysel değerlerle iyi bir uyum gösterdiği görülmektedir. Sadece Cu'nun gümüş açısından zengin taraftaki maksimum çözünürlüğü biraz fark göstermektedir. Bunun nedeni gümüş açısından zengin taraftaki deneysel verilerin önemli ölçüde dağınık olmasıdır. Ayrıca optimizasyonda kullanılan Cu'nun Ag içindeki maksimum çözünürlüğüne ait ölçülmüş Bienzle [6]'nin aktivite değerlerinden yapılan ekstrapolasyon başka deneysel çalışmalar tarafından yeniden doğrulanmayan verilerdir. Cu'nun gümüş açısından zengin taraftaki fcc fazı aktivitesi ve seçilen ilgili termodinamik değerler Şekil 4 ve Şekil 5'te çizilmiştir. Şekil 4'te görüldüğü üzere bu optimizasyon ile hesaplanan bakır aktivite değerleri Bienzle [6] tarafından ölçülmüş değerler ile uyum göstermektedir. Şekil 5'te ise Bienzle [6] tarafından ölçülen katı faz karışım entalpi değerleri ve Hayes [38] verilerinden hesaplanan değerler karşılaştırılmaktadır. Optimizasyon ile hesaplanan değerlerin Bienzle [6] tarafından yapılan ölçümlerle daha uyumlu olduğu görülmektedir.

Tablo 3. Ag-Cu sistemindeki özel reaksiyon/dönüşüm koordinatları

Reaksiyon	Cu mol kesri			Sıcaklık K	Dönüşüm	Referans
α -fcc \leftrightarrow Sıvı	0.129	0.416	0.955	1054.4		[38]
	0.121	0.398	0.953	1053.4		[5]
	0.141	0.397	0.951	1055.8		[41]
	0.136	0.398	0.952	1054.0	Ötektik	[37]
	0.141	0.399	0.951	1052.2		[4]
	0.134	0.399	0.978	1053.1		[20]
	0.095	0.399	0.954	1052.3		Bu çalışma
Cu(katı) \leftrightarrow Cu (sıvı)	0			1234.9	Erimel	[4]
Ag(katı) \leftrightarrow Ag(sıvı)	1			1357.8	Erimel	[4]



Şekil 4. Katı fazda gümüşçe zengin bölgede Cu aktivitesinin derlenmiş deneysel veriler ve optimizasyon ile karşılaştırması. Kırmızı düz çizgi bu optimizasyon çalışmasıdır.

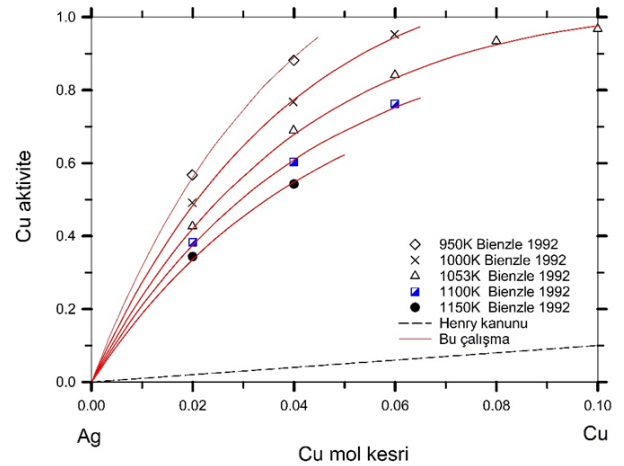


Şekil 5. Cu-Ag katı faz sisteminde 1053 K' de karışım entalpisi.

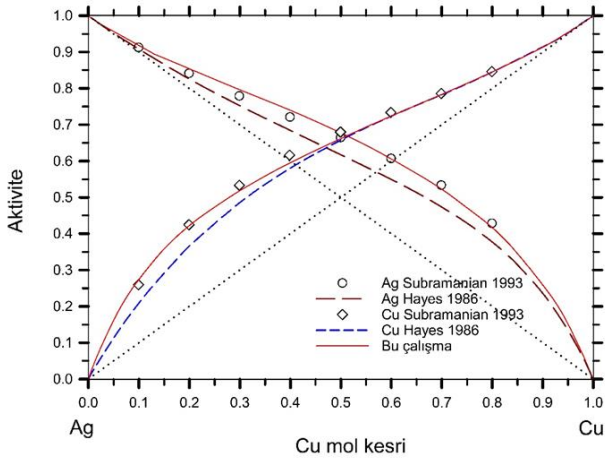
Hesaplanan ve deneysel olarak bulunan sıvı faz fazlalık Gibbs serbest enerjisi değerleri Şekil 6' da

karşılaştırılmaktadır. Şekil 6' da Subramanian [4] tarafından rapor edilen veriler ile bu optimizasyon çalışmasından yapılan hesaplamaların uyum gösterdiği görülmektedir. Fakat Hayes [38]' e ait verilerden çizilen grafik negatif olarak ayrılmaktadır. Ayrıca Hayes [38]' e ait verilerden bulunan değerlerin maksimum noktasının gümüş zengin kompozisyona kaydığı görülmektedir. Fakat optimizasyonla bulunan değerler ve deneysel veri noktaları ise Cu kompozisyonunun 0.5 mol % değerinde simetri göstermektedir. Şekil 7' de ise 1400 K sıcaklıktaki sıvı fazda kısmi molar aktivite değerleri gösterilmektedir. Bu çalışmada optimize edilen Ag ve Cu aktivite eğrilerinin Hayes [38]' e ait verilerden hesaplanan değerlere kıyasla Subramanian [4]' dan alınan deneysel verilere çok daha uyumlu olduğu görülmektedir.

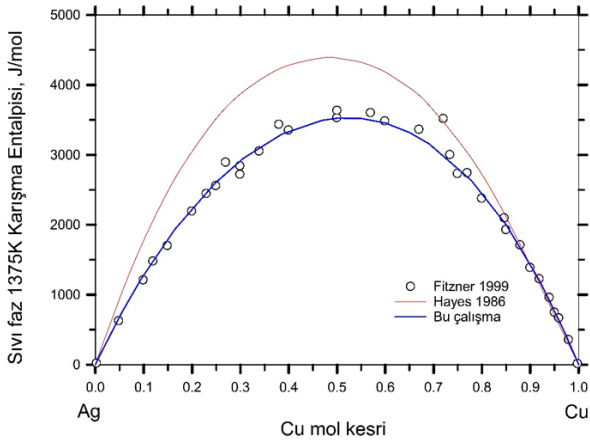
Sıvı fazdaki karışma entalpisinin 1375 ± 2 K sıcaklığındaki hesaplanmış ve deneysel verileri Şekil 8' de çizilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi hesaplanan entalpi eğrisi Fitzner [36]' e ait deneysel verilerle uyumludur. Fakat Hayes [38]' e ait hesaplamalar ve deneysel veriler ile Fitzner [36]' e ait veriler arasında belirgin bir tutarsızlık bulunmaktadır.



Şekil 6. Cu-Ag sıvı faz sisteminde 1400 K' de fazlalık Gibbs enerjisi.



Şekil 7. Sıvı fazda Ag ve Cu'nun 1400 K'de aktivite grafiği. Referans haller Ag ve Cu sıvı fazlarıdır.



Şekil 8. Sıvı fazda Cu-Ag sisteminin 1375±2 K sıcaklıkta karışım entalpi grafiği.

Gümüş ve bakırın stabil saf katı fazları yüzey merkezli kübik (fcc) formunda kristal kafes yapısına sahiptir. Cu ve Ag aynı periyodik sütunda bulunmaktadır ve elektronegativite değerleri de sırasıyla 1.90 ve 1.93 olarak birbirine çok yakındır. Ayrıca Cu ve Ag için erime noktaları sırasıyla 1357.7 K ve 1234.93 K'dir. Buna rağmen Cu-Ag sisteminin faz diyagramında α -fcc ile tanımlanan katı karışımının Ag zengin ve Cu zengin tarafında sınırlı çözünürlük görülmektedir. Bu durum ilk bakışta Hume-Rothery teorisinin bir istisnası gibi görünmektedir. Fakat bu ayrışmanın sebebi olarak atomik yarıçapların farklı olması öne sürülebilir. Literatürde atomik yarıçaplar ile ilgili çok farklı hesaplamalar bulunmaktadır. Bu verilerden ampirik olarak Slater [43] tarafından elde edilen Cu ve Ag atom yarıçapları sırasıyla 160 nm ve 135 nm ve van der Waals yarıçap değerleri Bondi [44] için ise sırasıyla 172 nm ve 140 nm'dir. Bu verilerden Hume-Rothery formülü hesaplamasına göre gümüş ve bakır arasındaki atomik yarıçap farkının Slater [43] için %15.6-18.5 ve Bondi [44] için %18.6-22.8 olarak %15'lik limitin üstünde olması faz ayrışmasını açıklamaktadır.

4 Sonuçlar

İkili Bakır-Gümüş (Cu-Ag) sistemi termodinamik veri tabanı CALPHAD (CALculation of PHase Diagram) metodu kullanarak mevcut deneysel verilere dayalı olarak optimize edilmiştir. Katı gümüş fazında maksimum Cu çözünürlüğü mol kesri olarak 0.095 bulunmuştur. Bakır katı fazında ise maksimum Ag çözünürlüğü mol kesri olarak 0.047 bulunmuştur. Bragg-Williams gelişigüzel karışım teorisi modeli sıvı fazı ve katı α -fcc fazını tanımlamak için kullanılmıştır. En son ölçülmüş literatür Cu aktivite ve karışım entalpi verileri optimizasyon işleminde kullanılmıştır. Optimizasyon sonucu elde edilen veri tabanından tipik ötektik Cu-Ag faz diyagramı hesaplanmıştır. Ötektik dönüşüm sıcaklığı ise 1052.3 K olarak literatür verilerine uyumlu bulunmuştur. Faz diyagramının saçılmış Ag zengin bölgesindeki deneysel noktalar haricinde genel olarak verilerle uyumlu bir grafik elde edilmiştir. Katı fazda gümüşçe zengin bölgede Cu aktivitesinin derlenmiş deneysel verileri değişik sıcaklıklarda karşılaştırılmıştır. Şekil 4'te görüldüğü üzere bu değerler optimizasyon ile çok yakından örtüşmektedir. Şekil 5'te görüldüğü üzere Cu-Ag katı faz sisteminde 1053 K'de karışım entalpi optimizasyon değerleri deneysel verilerle uyumlu bulunmuştur. Cu-Ag sıvı faz sisteminde 1400 K'de fazlalık Gibbs enerjisi verileri genel olarak literatür ile uyumlu bulunmuştur. Sıvı fazda Ag ve Cu'nun 1400 K'de aktivite grafiği deneysel verilerle uyumlu bulunmuştur. Sıvı fazda Cu-Ag sisteminin 1375±2 K sıcaklıkta karışım entalpi en son deneysel verilerle uygunluk göstermiştir. Genel olarak bu optimizasyon çalışmasından elde edilen termodinamik özellikler ve mevcut çalışmadaki faz diyagramı önceki veri tabanlarına göre en son deneysel veriler ile daha iyi bir uyum göstermektedir.

Çıkar çatışması

Çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 10

Kaynaklar

- [1] C. P. Thompson, L. Chen, W. N. Shafarman, J. Lee, S. Fields, and R. W. Birkmire, Bandgap gradients in (Ag, Cu) (In,Ga)Se₂ thin film solar cells deposited by three-stage co-evaporation. 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), pp. 14-19, New Orleans, LA, USA, 2015.
- [2] H. Matsuo, K. Yoshino and T. Ikari, Characterization of AgGaSe₂ thin films grown by post annealing method. Thin Solid Films, 515(2), 505-508, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.12.281>.
- [3] J. L. Shay and J. H. Wernick, Ternary chalcopyrite semiconductors: Growth, electronic properties and applications. Pergamon, Oxford, 1975.
- [4] P. Subramanian and J. Perepezko. The Ag-Cu (silver-copper) system. Journal of Phase Equilibria, 14, 62-75, 1993. <https://doi.org/10.1007/BF02652162>.

- [5] V. T. Witusiewicz, U. Hecht, S. G. Fries and S. Rex, The Ag—Al—Cu System: Part 1: Reassessment of the Constituent Binaries on the Basis of New Experimental Data. *Journal of Alloys and Compounds*, 385(1-2), 133-143, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.04.126>.
- [6] M. Bienzle, T. Oishi, F. Sommer and K. Ono, Thermodynamic Study of the Silver-Rich Ag-Cu Solid-Solution. *Materials Transactions Jim*, 33, 51-56, 1992. <https://doi.org/10.2320/matertrans1989.33.51>.
- [7] C. T. Heycock and F. H. Neville, Complete Freezing-Point Curves of Binary Alloys Containing Silver or Copper Together with Another Metal. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 189, 25-69, 1897. <https://www.jstor.org/stable/90689>.
- [8] K. Friedrich and A. Leroux, Copper, Silver, and Lead. *Metallurgie*, 4, 293-315, 1907.
- [9] T. Hirose, On the Silver-Copper Alloys. *Rept Imp. Mint Osaka* 1, 1, 1-74, 1927.
- [10] W. Broniewski and S. Kostacz, On the Alloys of Ag-Cu. *Compt. Rend.*, 194, 973-975, 1932.
- [11] C. S. Smith and W. E. Lindlie, The Equilibrium Diagram of the Copper-Rich Copper-Silver Alloys. *Trans. AIME*, 91, 101-118, 1932.
- [12] B. Dobovisek and A. Paulin, Report on Caloric Measurements with the DTA at High Temperatures. *Min. Met. Quart.*, 3, 27-32, 1962.
- [13] A. Rosina, N. Smajic, and B. Dobovisek, Application of Differential Thermal Analysis in Calorimetry. *Mikrochim. Acta*, 4, 626-638, 1967. <https://doi.org/10.1007/BF01224382>.
- [14] U. V. Choudary and A. Ghosh, Thermodynamics of Liquid Copper-Silver Alloys by a Solid Electrolyte Cell. *J. Electrochem. Soc.*, 117, 1024-1028, 1970. <https://dx.doi.org/10.1149/1.2407712>.
- [15] J. Markali and P. Thoresen, The Ag-Rich Side of the Binary Phase Diagrams Ag/Au and Ag/Cu as Studied by Zone Refining. *Acta Chem. Scand*, 15(1), 31-35, 1961. <https://doi.org/10.3891/acta.chem.scand.15-0031>.
- [16] W. F. Roeser, Thermo-Electric Temperature Scales. *U.S. Bur. Stds. J. Res.*, 3, 343-358, 1929.
- [17] D. Stockdale, The Solid Solutions of the Copper-Silver System. *J. Inst. Metals*, 45, 127-155, 1931.
- [18] H. Moser, J. Otto, and W. Thomas, Gasthermometrische Messungen bei Hohen Temperaturen. III. *Z. Phys.*, 175, 327-336, 1963. <https://doi.org/10.1007/BF01375109>.
- [19] M. Hansen, Die Härte silberreicher Kupfer-Silberlegierungen. Bestimmung der Löslichkeit von Kupfer in Silber mit Hilfe von Härtemessungen. *Z. Anorg Allg Chem*, 186(1), 41-48, 1929. <https://doi.org/10.1002/zaac.19291860104>.
- [20] Z. Bahari, M. Elgadi, J. Rivet, and J. Dugué, Experimental study of the ternary Ag-Cu-In phase diagram. *Journal of Alloys and Compounds*, 477, 152-165, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.10.030>.
- [21] N. Ageew, M. Hansen, and G. Sachs, Entmischung und Eigenschaftsänderungen übersättigter Silber-Rupferlegierungen. *Z. Phys.*, 66, 350-376, 1930. <https://doi.org/10.1002/zaac.1929186010>.
- [22] E. A. Owen and J. Rogers, X-Ray Study of Copper-Silver Alloys. *J. Inst. Metals*, 57, 257-266, 1935.
- [23] R. P. Elliott, F. A. Shunk & W. C. Giessen, The Ag-Cu (Silver-Copper) system. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 1, 41-45, 1980. <https://doi.org/10.1007/BF02883284>.
- [24] E. Schmid and G. Siebel, Über die Mischkristallbildung beiein- und Vielkristallinem Material. *Z. Phys.*, 85(1-2), 36-55, 1932. <https://doi.org/10.1007/BF01330777>.
- [25] E. Schmid and G. Siebel, (as quoted in Hansen). *Z. Phys.*, 85, 41-55, 1933.
- [26] F. Sommer, Yayınlanmamış data (as quoted in 2004 Witusiewicz et al.). MaxPlank-Institut für Metallforschung, 2000.
- [27] R. A. Oriani and W. K. Murphy, Differential Calorimeter for Heats of Formation of Solid Alloys. Heats of Formation of Alloys of the Noble Metals. *J. Phys. Chem.*, 62, 327-331, 1958. <https://doi.org/10.1021/j150561a020>.
- [28] J. Kucera, L. Dvorak, and Z. Kudelasek, Tensimetric Measurement of Thermodynamic Functions of Silver in Ag-Cu Alloys by Method of Isotope Exchange. *Ceskoslov. CasopisFys.*, 11, 277-284, 1961.
- [29] R. K. Edwards and J. H. Downing, The Thermodynamics of the Liquid Solutions in the Triad Cu-Ag-Au. I. The Cu-Ag System. *J. Phys. Chem.*, 60, 108-111, 1956. <https://doi.org/10.1021/j150535a026>.
- [30] J. Golonka, J. Botor, and M. Dulat, Study of Copper-Silver Liquid Solutions by Combined Effusion Vaporization and Mass Spectrometry Sensing. *Metals Tech.*, 6, 267-272, 1979. <https://doi.org/10.1179/030716979803276084>.
- [31] O. P. Mohapatra and M. G. Froberg, Calculation of Activities of Binary Metallic Systems from Distribution Equilibria Measurements with Fused Salt Mixtures. *Z. Metallkd.*, 65, 58-62, 1974.
- [32] U. V. Choudary and A. Ghosh, Thermodynamics of Liquid Copper-Silver Alloys by a Solid Electrolyte Cell. *J. Electrochem. Soc.*, 117, 1024-1028, 1970. <https://doi.org/10.1149/1.2407712>.
- [33] S. Wagner, G. Sodeck, and A. Neckel, Thermodynamic Excess Quantities of Liquid Binary Silver-Copper by Mass Spectrometry. *High Temp. Sci.*, 3, 481-490, 1971.
- [34] S. M. Howard, Direct Activity Measurements in Liquid Ag-Cu Alloys. *Metall Trans. B*, 20, 845-852, 1989. <https://doi.org/10.1007/BF02670189>.
- [35] R. Hultgren, P. D. Desai, D. T. Hawkins, M. Gleiser, K. K. Kelley, Report-Selected Values of the Thermodynamic Properties of Binary Alloys, ASM, Metal Park, 1973. <https://doi.org/10.1002/zaac.19291860104>.

- [36] K. Fitzner, Q. Guo, J. Wang, and O. J. Kleppa, Enthalpies of liquid–liquid mixing in the systems Cu–Ag, Cu–Au and Ag–Au by using an in-situ mixing device in a high temperature single-unit differential calorimeter. *Journal of Alloys and Compounds*, 291(1-2), 190-200, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(99\)00279-0](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(99)00279-0).
- [37] J. L. Murray, Calculations of Stable and Metastable Equilibrium Diagrams of the Ag-Cu and Cd-Zn Systems. *Metall. Trans. A*, 75, 261–268, 1984. <https://doi.org/10.1007/BF02645110>.
- [38] F. H. Hayes, H. L. Lukas, G. Effenberg, and G. Petzow, A Thermodynamic Optimisation of the Cu-Ag-Pb System. *Z. Metallkd.*, 77(11), 749–754, 1986.
- [39] M. S. Lim, K.E. Tibballs, P.L. Rossiter, An assessment of thermodynamic equilibria in the Ag-Al-Cu-Mg quaternary system in relation to precipitation reactions. *Zeitschrift für Metallkunde*, 88, 236-245, 1997. <https://10.3139/ijmr-1997-0044>.
- [40] A. Kusoffsky, Thermodynamic evaluation of the ternary Ag–Au–Cu system including a short range order description. *Acta Materialia*, 50(20), 5139-5145, 2002. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(02\)00382-8](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(02)00382-8)
- [41] X. C. He, H. Wang, H. S. Liu, and Z. P. Jin, Thermodynamic description of the Cu–Ag–Zr system. *Calphad*, 30, 367-374, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2006.09.001>.
- [42] A. T. Dinsdale, Sgte Data for Pure Elements. *Calphad*, 15(4), 317-425, 1991. [https://doi.org/10.1016/0364-5916\(91\)90030-N](https://doi.org/10.1016/0364-5916(91)90030-N).
- [43] J. C. Slater, Atomic Radii in Crystals. *J. Chem. Phys.*, 41, 3199-3204, 1964. <https://doi.org/10.1063/1.1725697>.
- [44] A. Bondi, van der Waals Volumes and Radii. *The Journal of Physical Chemistry*. 68(3), 441–45, 1964. <https://doi.org/10.1021/j100785a001>.





Torna talaşı atıklarından demir oksit esaslı aerjel tozu üretimi ve karakterizasyonu

Production and characterization of iron oxide based aerogel from steel sawdust waste

Furkan Ahmet Coşkun¹ , Melih Tümer² , Zafer Yayuz Merkit^{3,*} , Hüseyin Özkan Toplan⁴ 
Nil Toplan⁵ 

^{1,2,3,4,5} Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 54187, Sakarya, Türkiye

Öz

Mevcut çalışmada metal oksit aerojeller grubunun bir üyesi konumunda olan demir oksit aerojellerin torna talaşı atıklarından üretilebilirliği incelenmiştir. Bu amaçla halkalı değirmende öğütülerek ince taneli boyuta getirilmiş torna talaş atıkları, asitte çözündürülüp baz ile nötrale edilmiş ve jelleşmeye bırakılmıştır. Jelleşme süreci sonunda jel kaynar saf ile yıkanarak demir oksit esaslı aerjel tozu elde edilmiştir. Elde edilen demir oksit aerjel tozunun XRD ile faz analizi, SEM ve EDS görüntüleri ile mikroyapı analizi, Zeta potansiyeli ile ortalama tane boyut ve potansiyel aralıkları ve FTIR ile bağ yapıları karakterize edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Demir oksit aerjel, Metal oksit aerjel, Torna talaşı atığı, Sol-jel

1 Giriş

Demir esaslı nanopartiküller üstün fizikokimyasal ve biyolojik özelliklerinden dolayı nanoteknoloji ve nanomalzeme bilimi alanında ilgi çekici malzeme grubunu oluştururlar [1]. Özellikle önemli geçiş oksitlerden biri olan demiroksit esaslı bileşimler katalizör, pigment, sorbent, topaklaştırıcılar, gaz sensörleri, yağlayıcılar ve kaplama uygulaması alanında kendilerine önemli bir yer tutarlar. Demir oksitlerin; oksit, hidroksit ya da oksihidroksitlerden oluşturduğu bilinen 16 saf fazı bulunmaktadır. Bu fazlar Fe(OH)₃, Fe(OH)₂, Fe₅HO₈·4H₂O, Fe₃O₄, FeO, FeOOH'un beş polimorfu ve Fe₂O₃'ün dört polimorfundan oluşmaktadır. Başlıca termal ve hidrotermal sentezleme yöntemleri; kimyasal çökeltme, sol-jel, hidrotermal, sürfaktan aracılı çökeltme, emülsiyon-çökeltme, mikroemülsiyon-çökeltme, elektro-çökeltme ve mikro dalga destekli hidrotermal teknikler, piroliz ve ultrasonik destekli yöntemleri içermektedir [2,3]. Demir minerali esasında hemen hemen her toprak tipinde ve iklim bölgesinde bulunmakla birlikte yaygın olarak geotit (α -FeOOH) ve hematit formunda birlikte bulunurlar [4]. Ayrıca birçok endüstriyel ve maden atıkları demir oksit minerallerinin ferrit oksit ve hidroksit, oksihidroksit formunu da içerirler [5]. Günümüzde demir-oksit esaslı bileşimlerin üretiminde tufal [6] gibi atıklar da kullanılmaktadır.

Geotit doğada yaygın bulunan kararlı bir demir oksittir. Kimyasal kararlılığı, toksik olmaması ve düşük maliyeti

Abstract

In the present study, the producibility of iron oxide aerogels, which is a member of the metal oxide aerogels group, from lathe waste was investigated. For this purpose, lathe sawdust wastes, which were ground in a ring mill and made fine-grained, were dissolved in acid, neutralized with base and left to gel. At the end of the gelation process, iron oxide aerogel powder was obtained by washing the gel with boiling distilled water. The iron oxide aerogel powder was analyzed for phase, microstructure, average grain size, potential ranges, and bond structures using XRD, SEM and EDS images, Zeta potential, and FTIR, respectively.

Keywords: Iron oxide aerogel, Metal oxide aerogel, Steel sawdust waste, Sol-gel

nedeni ile çevresel atıkların parçalanması (bertaraf edilmesi), seramik sırlarda renk pigmenti olarak çeşitli uygulama alanına sahiptirler [7]. Sanayi ve evsel atıkları yoğun bir şekilde toprakta çeşitli organik ve inorganik kirleticilerin birikmesine neden olmaktadır. Bu atıkların zararsız hale getirilmesinde demir oksit bileşikleri önemli bir rol oynamaktadır.

Sentetik olarak da sentezlenen geotit, hematit ve amorf demir oksit gibi tekli demir oksit partikülleri biyolojik kirliliğe neden olan bakteriler ile arayüzeyleri boyunca adhezyon ile etkileşim gösterirler. Bu etkileşim bakteri ve demir oksit arasındaki yük farkından kaynaklı elektrostatik çekim esasına dayanmaktadır [8]. Elektrostatik, dipol-dipol, H-bağı, hidrofobik ve Van der Waals etkileşimleri gibi spesifik olmayan farklı etkileşimler, bakterilerin herhangi bir malzeme yüzeyine yapışmasından sorumludur ve bakteriyel biyofilmler oluşturur [9]. Biyomedikal alanda manyetik özelliğe sahip demir oksitlerden olan magnetit (Fe₃O₄), maghemit (γ -Fe₂O₃), hematit (α -Fe₂O₃), ve geotit fazını oluşturan nanopartiküller ilaç izleme ve iletimi, hücre görüntülemesi, doku mühendisliği alanında fayda sağlayarak kanser ve hipertemi tedavisinde umut verici malzemeleri oluştururlar [8, 9-11]. Günümüzde yüksek oranda antibiyotik kullanımından kaynaklı gram(+) ve gram(-) bakterilerin oluşturduğu bir antibiyotik direnci mevcuttur. Demir oksit esaslı nano partiküllerin toksik olmayışı ve yüksek yüzey alanı ile beraber kimyasal reaktivitelerinin de yüksek olması

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: zafermerkit@gmail.com (Z. Y. Merkit)

Geliş / Received: 04.01.2024 Kabul / Accepted: 27.02.2024 Yayınlanma / Published: 15.04.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1409401

sebebi ile çeşitli bakteriyel hastalıkların tedavisinde kullanılmaktadır [11].

Tekstil ve boya atık sularından tehlikeli maddelerin bertaraf edilmesinde demir esaslı nano partiküller etkin olarak kullanılmaktadır. Fe^{3+}/Fe^{2+} oksijen arasındaki fotoredoks reaksiyonlarının aracılık ettiği fotokimyasal ayrışmalar neticesinde çevresel olarak zararlı bir takım kimyasallar bozundurulabilmektedir [3]. Fenton prosesi yardımı ile toprak ve atık su iyileştirme süreçlerinde demiroksit nanoparçacıklar katalizör olarak kullanılmaktadır. Bu süreçte geniş pH aralığında dahi H_2O_2 'den reaktif radikaller üretme yeteneğini koruyan demiroksit bileşimleri kolayca geri kazanılabilmektedir. Kil gibi toksit olmayan mineraller ile takviye halinde kullanıldıklarında demiroksit topaklanmasının önüne geçilerek artan yüzey alanı ile oksidasyon kabiliyetinin korunması sağlanmış olmaktadır.

Toprak ve su kaynakları üzerinde bakteriyel kirlilikten başka önemli bir atık sorunu ağır metallerin etkisizleştirilmesidir. Sıfır değerlikli demiroksitler ve doğal bir demiroksi-hidroksit kaynağı olan geotit minerali arsenik, kurşun ve bakır gibi metallerin toprak ve su kaynaklarından iyileştirilmesi sürecinde klasik yöntemler olan katılaştırma, toprak yıkama, elektrokinetik ve fitoremediasyon gibi fiziksel/kimyasal yöntemlere göre avantaj içermektedir. Yerinde immobilizasyon yöntemi ile demir nano partiküller üzerinde absorpsiyon ve yüzey bileşenleri oluşturulması maliyet ve etkinlik açısından bu avantajın kaynağını oluşturmaktadır [12]. Demir hidroksitler; aktif yüzeyine fosforun yüksek afinitesinden dolayı başlıca fosfor absorbanıdır [13,14].

Aerojeller son 20 yılda hızla ticarileşerek geniş kullanım alanlarına sahip olmuşlardır. Demir aerojeller ve kserojeller, jelin sıvı bileşeninin bir gazla değiştirildiği; sıvının süperkritik olarak ekstrakte edilmesi (aerojel) veya yavaş buharlaştırma (kserojel) yoluyla demir oksit jellerinden türetilen düşük yoğunluklu katılardır [15]. Nano boyutlu gözeneklere sahip yüksek gözenekli metal oksit aerojelleri, fizikokimyasal, termal ve hafif özelliklerinden dolayı son zamanlarda endüstride ilgi çekmektedir. Aerojel hazırlamanın önemli bir yönü ekonomik açıdan rekabetçi olması gerektiğidir. Çözücü değiştirme yöntemiyle aerojel hazırlanmasında büyük hacimde çözücü kullanıldığından, çözücünün daha ucuz olması ve karışımdan kolayca geri kazanılması gerekmektedir [16,17]. Metal oksit aerojellerin bir malzeme üretim yöntemi olan sol-jel ile hazırlanması, diğer sentetik yöntemlere göre çeşitli avantajlar sergiler ve genellikle gözenekli, yüksek yüzey alanlı tozlar üretilebilir. Tipik olarak sol-jel yöntemi, hidroksit jelleri oluşturmak üzere kolayca hidrolize olabilen metal alkoksit öncülerini kullanır [18-21].

Çevre ve şehircilik bakanlığının Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelikte günlük konuşma dilinde “yağlı talaş” olarak nitelendirilen atıkların, torna ve freze makinelerinden kaynaklanan ve herhangi bir kesme sıvısı ile bulaşık olmayan metal talaşları ile freze gibi işlemlerden kaynaklanan metal talaşları birbirleri ile karıştırılması neticesinde metal talaşlarının niteliğinin doğru olarak belirlenmemesi nedeniyle geri kazanım/bertaraf yöntemi ile

atık envanterinde sorunlara yol açtığı belirtilmektedir. Mevcut çalışmada atık torna talaşlarının geri dönüşümünün sol-jel yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

2 Materyal ve metod

2.1 Başlangıç malzemeleri

Demir oksit hammadde tozu olarak torna talaşı atıkları, baz kaynağı olarak sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi, asit kaynağı olarak sülfürik asit (H_2SO_4) çözeltisi, saf su, üretimde kullanılmak üzere; balon joje, beher, filtre kağıdı, mezure, manyetik karıştırıcı aparatı, ısıtıcı karıştırıcı ve pH kağıdı kullanılmıştır.

2.2 Deneyin yapılışı

Demir oksit esaslı aerojel tozu üretimi için torna talaşı atıkları başlangıç hammadde tozları olarak kullanılmıştır. Başlangıç hammadde tozları tane boyutlarını incelemek amacıyla halkalı değirmende öğütülmüştür. Öğütülmek tane boyutu küçültülen hammadde tozları kaynar saf su ile 3 kere yıkamanın ardından kaynar saf su içerisinde etüve konulmuş ve etüvde $80^{\circ}C$ 'de 24 saat bekletilmesinin ardından süzümüştür. Ardından tekrar 3 kere yıkanmıştır. Burada amaç, hammadde tozlarını yağ ve kirlerden arındırmaktır. Daha sonra başlangıç hammadde tozlarının EDS analizi ile içeriğindeki kimyasal elementler tespit edilmiştir. Hassas terazi ile 20 gram başlangıç hammadde tozu kütüğe $10'$ (1M) luk sülfürik asit (H_2SO_4) çözeltisinde 3 saat boyunca çeker ocakta $150^{\circ}C$ 'de karıştırılmış ve filtre kağıdı yardımıyla süzümüştür. Daha sonra kütüğe $14'$ lük sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi ile nötralize edilmiştir. Nötralize edilen jel yaşlandırılmak üzere 15 gün oda sıcaklığında bekletildikten sonra filtre kağıdı ile süzümüş ve “yıkamamış ıslak jel” elde edilmiştir. Yıkamamış ıslak jel etüvde 24 saat süre ile $100^{\circ}C$ sıcaklıkta kurutularak “yıkamamış kuru jel” haline getirilmiştir. Daha sonra yıkamamış kuru jel 10 kere $100^{\circ}C$ 'lik saf su (distile su) ile yıkamış ve her yıkamadan sonra süzülerek “yıkamış jel” elde edilmiştir. Etanol ile yıkamış jel, etüvde 24 saat süre ile $100^{\circ}C$ sıcaklıkta kurutularak “saf su ile yıkamış kuru jel tozu (Demir oksit esaslı aerojel tozu) elde edilmiştir.

2.3 Karakterizasyon yöntemleri

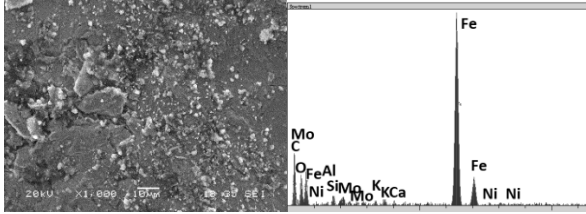
Başlangıçta öğütülüp yıkanmış ve kurutulmuş hammadde tozuna bünyesindeki elementleri tespit amacıyla EDS analizi, yıkamamış nötr filtre üstü jel tozuna, saf su ve etanol çözeltisi ile yıkanmış jelle yapıdaki fazları görmek amacıyla $2\theta=5-80^{\circ}$ aralığında XRD analizi, mikroyapıyı incelemek üzere Jeol 6060 LV SEM cihazı ile SEM ve EDS analizi yapılmıştır.

Zeta potansiyeli ve partikül boyutu ölçümü Malvern Panalytical Zetasizer pro cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Zeta ölçümü için kuru jel tozları ultrasonik karıştırıcı yardımı ile saf su içerisinde dağıtılmış elde edilen süspansiyon üzerinden analizler gerçekleştirilmiştir. Oluşan bağ yapılarının karakteristiği Perkin Elmer Spectrum Two markalı FTIR analiz cihazı ile incelenmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Başlangıç hammadde tozlarının analizi

Halkalı değirmende öğütülüp saf su ile yıkandıktan sonra etüvde kurutulmuş başlangıç hammadde tozlarının SEM fotoğrafı ve EDS analizinden elde edilen kimyasal içerik Şekil 1'de görülmektedir. EDS analizi sonrası bileşim içerisindeki elementlerin ağırlıkça yüzde miktarı Tablo 1'de sayısal olarak verilmektedir.



Şekil 1. Başlangıç hammaddesinin (torna talaşı atığının) SEM-EDS analizi

Tablo 1. Başlangıç hammaddesinin (torna talaşı atığının) EDS analiz sonucu

Elt.*	C	O	Si	K	Cr	Fe	Ni	Mo	Al
Kons.* (%)	5.65	2.50	1.70	1.01	1.40	86.37	0.6	0.67	0.1

Elt: Element, Kons: Konsantrasyon

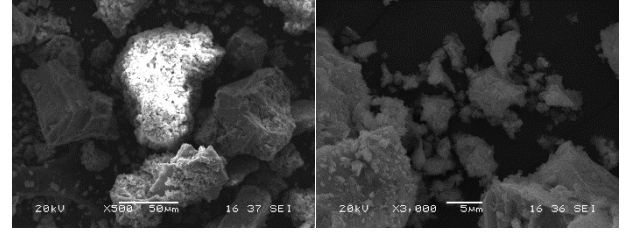
Şekil 1 incelendiğinde en yoğun elementler olarak demir ve oksijen elementleri (demir oksit bileşiği) görülmektedir. Başlangıç talaşları halkalı değirmende öğütülmesi sonrası toz boyutlarının farklı şekil ve boyutta olduğu bu durumun mekanik öğütmeden kaynaklı olduğu belirtilebilir. Tablo 1'de gösterilen ağırlıkça %5.65 karbonun, SEM incelemesi için tozların yapıştırıldığı karbon filmde geldiği düşünülmektedir. Ayrıca tornada sadece dökme demir ve pik demir değil bazı durumlarda paslanmaz çelik işlenmesi de yapıldığı için torna talaşı atığında çok az miktarda Ni, Al ve Mo elementleri bulunmaktadır.

3.2 Yıkanmamış filtre üstü jelin analizi

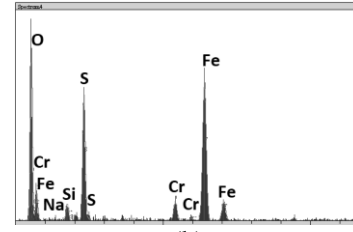
Başlangıç tozlarının %10'luk H₂SO₄ asitte çözülmesi ve ardından NaOH çözeltisi ile nötrale edilmesi sonucu elde edilen jelin yıkanmadan kurutulması sonucu SEM, EDS ve XRD analizi alınmıştır. Yıkanmamış jelin farklı büyültmelerde (X500 ve X3000) SEM-EDS analizi Şekil 2'de görülmektedir. EDS analizi sonrası bileşim içerisindeki elementlerin yüzdece miktarı Tablo 2'de sayısal olarak verilmektedir.

Şekil 2(a)'da kurutulmuş ancak yıkanmamış filtre üstü jelin farklı büyültmelerde SEM mikroyapı görüntüsü görülmektedir. 500x büyütme altında ortalama 50 µm boyutunda taneler görülmektedir. Yüksek büyütme altında taneler incelendiğinde 1-5µm boyuta sahip partiküllerin topaklar halinde birleşerek büyük taneleri oluşturduğu görülmektedir. Şekil 3'te yıkanmamış jelde oluşan taneleri detaylı olarak tanımlamak için noktasal EDS analizi görüntüsü verilmektedir. 1 numaralı tanenin düşük boyuttaki partiküllerin topaklanması sonucu oluştuğu açık olarak görülmektedir. 1 ve 2 numaralı noktalardan alınan EDS analizi sonucu benzer konsantrasyonda Fe, Na, S, O

elementlerini karakterize eden pikler görülmektedir. EDS analizi sonucu bu partiküllerin hidrate olmuş demir sülfat (FeSO₄) bileşiğinin varlığını tanımlamaktadır.



(a)



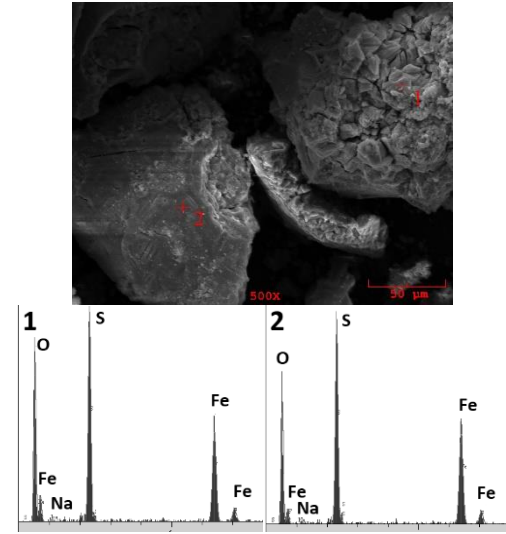
(b)

Şekil 2. Yıkanmamış filtre üstü jelin SEM-EDS analizi

Tablo 2. Yıkanmamış filtre üstü jelin EDS analiz sonucu

Elt.*	O	Na	Si	S	Cr	Fe
Kons.* (ağ.%)	39.46	0.24	2.00	13.34	3.54	41.41

Elt: Element, Kons: Konsantrasyon

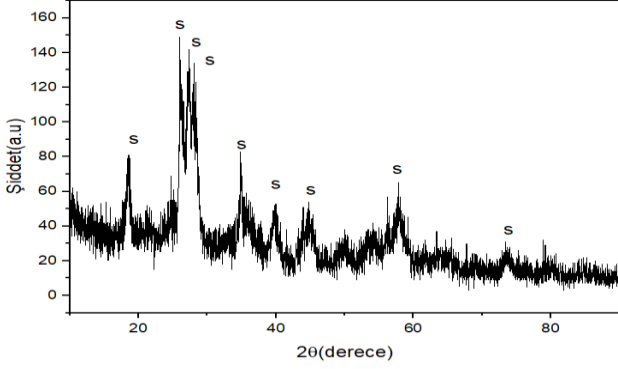


Şekil 3. Yıkanmamış filtre üstü jelin noktasal EDS analizi

Şekil 2(b)'de ve Tablo 2'de sayısal olarak konsantrasyon yüzdesi verilen yıkanmamış jelin EDS analizi incelendiğinde çok yüksek miktardaki Fe ve O elementlerine ek olarak yüksek miktarda S elementi görülmektedir. Fe ve O elementleri başlangıç hammaddelerinden gelmekte iken S elementi başlangıç hammadde tozlarının %10'luk sülfürik asitte çözülmesi sonucu oluşan sülfatlı demir bileşiğinden geldiği düşünülmektedir. Yıkanmamış jelin XRD analizi ise Şekil 4'te görülmektedir.

Şekil 4'teki yıkanmamış jelin XRD analizi incelendiğinde hakim faz yapısının amorf yapı olmasına

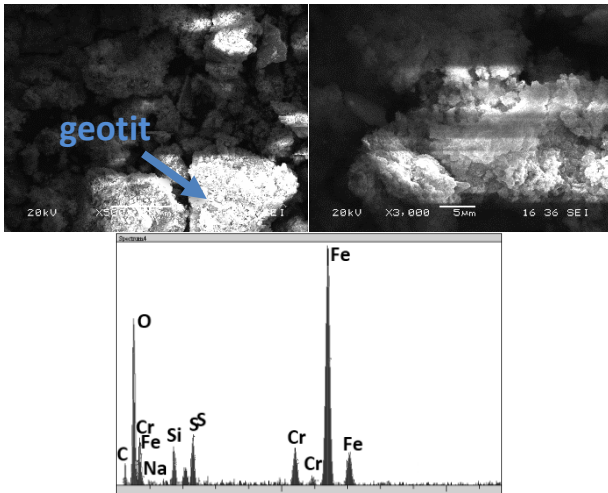
rağmen; yapıda $2\theta=18.42^\circ, 26.13, 27.31, 28.04, 34.88, 44.83$ ve $5,86^\circ$ 'larda hidratlı demir sülfat bileşiği (01-074-1332) görülmektedir. Bu durum EDS ve XRD analizlerinin tutarlılığını ve hidroksit oluşumu dolayısıyla beklenen jelleşmenin gerçekleştiğini ifade etmektedir. Başlangıç tozlarının sülfürik asit ile tepkimesi sonucu hidratlı bir demir sülfat bileşiği oluşması asitte çözme ve nötralizasyon işlemlerinin başarıya ulaştığını göstermektedir.



Şekil 4. Yıkılmamış Jelin XRD Analizi (s: hidratlı demir sülfat bileşiği)

3.3 Yıkılmış jelin analizi

Şekil 5'te kaynar saf su ile yıkılmış jelin farklı büyültmelerde (X500 ve X3000) SEM fotoğrafı görülmektedir. 1µm boyutu ve altındaki partiküllerin aglomera olarak daha büyük taneleri oluşturduğu yüksek büyütmede görülmektedir. Oluşan bu mikron altı küresel yakın şekildedeki geotit tane toprakları aralarında jel yapısından kaynaklı nano ve mezo gözenekler oluşturmaktadır. EDS analizi sonucunda elde edilen kimyasal içerik Tablo 3'te verilmektedir. SEM-EDS verileri incelendiğinde yüksek miktarda Fe ve O elementleri görülmektedir. Ayrıca analizde S ve Na elementlerinin miktarının yıkılmamış jele kıyasla azaldığı görülmektedir. Bu durum, yıkama işleminin amacına uygun yapıldığını, diğer bir ifade ile jel bünyesindeki asit ve baz atıklarının uzaklaştırıldığını göstermektedir.



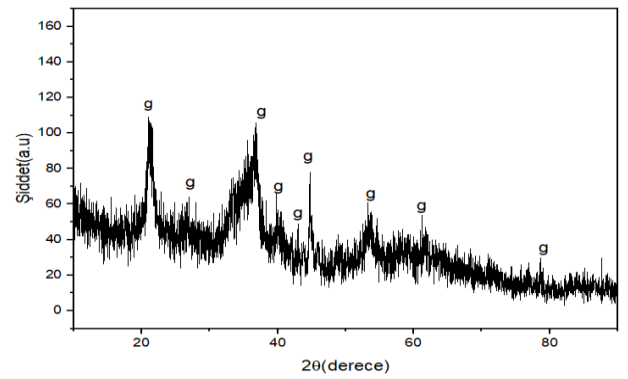
Şekil 5. Yıkılmış jelin SEM-EDS Analizi

Tablo 3. Yıkılmış jelin EDS analiz sonucu

Elt.*	C	O	Na	Si	S	Cr	Fe
Kons.* (ağ.%)	4.02	26.48	0.42	3.30	4.10	4.79	56.79

Elt: Element, Kons: Konsantrasyon

Şekil 6'da yıkılmış jelin XRD analizi görülmektedir. Şekil 6'da yıkılmış jelin XRD analizi incelendiğinde amorf yapının yanı sıra demir oksit hidroksit (geotit) fazı (01-081-0462) $2\theta=21.39, 36.46, 44.63$ ve 53.12° açılarında görülmektedir. Yıkama sonrası sülfatlı bileşik parçalanmış ve çözültüye geçmiştir. Diğer bir ifade ile jel bünyesinden uzaklaşmış ve geotit fazını oluşturmuştur. XRD fazında demir oksit hidroksit (geotit) fazının çıkması, EDS sonuçları ile uyumludur.



Şekil 6. Yıkılmış jelin XRD analizi (g: demir oksit hidroksit (geotit) fazı (01-081-0462))

Maamur ve ark. pirinç kabuğu külünden aerogel ve kserojel üretimi yapmışlardır. Demir kaynağı olarak hidrat halinde demir nitrat kullanılmış olup; aerogeller için çözelti aşamasında, kserojeller için jelleşme sonrası demir eklenmiştir. Nihai olarak hematit ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) manyetik fazına sahip manyetik esaslı demir oksit-silika kompozit aerogel üretmişlerdir [22].

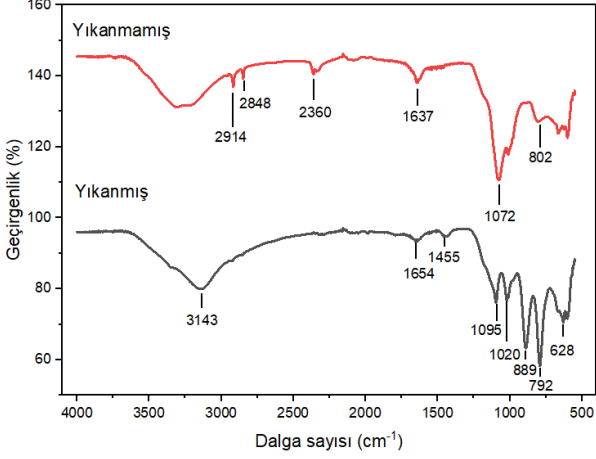
Long ve ark. demir (III) tuzları ve epoksit tabanlı ürünler kullanarak sol-jel yöntemi ile demir oksit aerogel üretmişlerdir. Yapısal incelemelerinde ürettikleri demir oksit esaslı aerogellerin ters spinel yapısı ile nanokristal formda olduklarını tespit etmişlerdir. Bununla birlikte yapıda hematit ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) ve manyetit (Fe_3O_4) fazlarının olduğunu raporlamışlardır [23].

3.4 Yıkılmış ve yıkılmamış jellerin FTIR ve Zeta potansiyeli sonuçları

Mevcut çalışmada elde edilen jellerin karşılaştırmalı olarak FTIR analizi sonuçlarının grafiği Şekil 7'de verilmektedir.

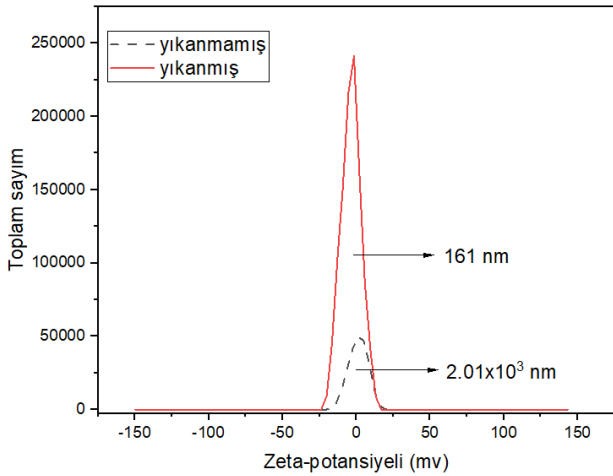
Yıkılmamış jelde salınım pikleri sırası ile 2914, 2848, 2360, 1637, 1072 ve 802 cm^{-1} dalga boylarında görülmektedir. Yıkılmış jelde ise 3143, 1654, 1455, 1095, 1020, 889, 792 ve 628 cm^{-1} dalga boyunda salınım pikleri mevcuttur. 3143 ve 1654 cm^{-1} bandı civarındaki salınımlar oksihidratların tipik O-H titreşimlerini karakterize ederken; $1020\text{-}628\text{ cm}^{-1}$ band aralığı geotit fazı ile uyumlu Fe-O titreşimine karşılık gelmektedir [24-27]. Yıkılmamış jel için 2914, 2848 ve 2360 cm^{-1} dalga boyuna denk gelen pikler ise

yapıda kalan Na ve S bağlarından kaynaklandığı düşünülmektedir. FTIR analizi ile yıkanmış nihai tozda Fe-O bağlarının varlığı sol-jel yöntemi ile atık talaşların Fe esaslı aerojel tozuna dönüştürüldüğünün göstergesi olarak belirtilebilir.



Şekil 7. Yıkanmış ve yıkanmamış jellerin FTIR analizi

Üretilen jellerin zeta-potansiyeli değerleri ve zeta-partikül boyut analizi sonucu elde edilen ortalama tane boyutu Şekil 8'de grafik ve sayısal değer olarak verilmektedir.



Şekil 8. Yıkanmış ve yıkanmamış jelin zeta-potansiyeli grafiği

Yıkanmamış jel için zeta-potansiyeli -17mv ile +19 mv arasında görülürken; yıkanmış jel için bu değerler -23 mv ile +16 mv arasında görülmektedir. Zeta potansiyeli, parçacıklar arasındaki elektrostatik veya yük itme/çekiminin büyüklüğünün bir ölçüsüdür ve stabiliteyi etkilediği bilinen temel parametrelerden biridir. Ölçümü dispersiyon, agregasyon veya flokülasyon nedenlerine ilişkin ayrıntılı bilgi sağlar ve dispersiyonların, emülsiyonların ve süspansiyonların formülasyonunu geliştirmek için kullanılabilir [28]. Benzer aralıkta sonuçlar geotit minerali için Shrimali ve ark. [29] tarafından raporlanmıştır. Mevcut çalışmada yıkanmış ve yıkanmamış jelin ortalama partikül

boyutları sırası ile 161 ve 2.01×10^3 nm olarak ölçülmüştür. Zeta potansiyelinin yüksek negatifliği nedeniyle parçacıklar düşük düzeyde de olsa topaklanma eğilimine sahiptir [30]. Bu nedenle yıkanmış jel için görülen geniş zeta-potansiyeli aralığının düşük parçacık boyutu ve kararlılığı ile alakalı olduğu söylenebilir.

4 Sonuçlar

Mevcut çalışmada; torna talaşı atıklarından demir oksit esaslı aerojel tozları üretilmiştir. Yapıdaki etkin fazın geotit fazı olduğu tespit edilmiştir. Hammaddelerin asit ile çözünme aşamasında çözünmemiş hammadde kalmamıştır. Bu durum %10'luk H_2SO_4 asit derişiminin yeterli olduğunu göstermektedir. İş güvenliği ve maliyet açısından daha sonraki çalışmalarda asit derişimi daha da azaltılıp asit derişiminin nihai jele etkisi incelenebilir. Bu çalışmada asitte çözme işlemi 3 saat yapılmıştır. Zaman tasarrufu açısından asitte çözme işlemi süresi azaltılıp prosese etkisi incelenebilir. Üretilen jel kaynar saf su ile 10 defa yıkanmış ve bunun sonucunda asitten gelen S elementi ve bazdan gelen Na elementi miktarı EDS analizi incelendiğinde çok düşük olarak belirlenmiştir. Yıkama yeterli olmuştur. Yıkama sayısı azaltılıp tekrar analiz edilerek su tasarrufu sağlamanın mümkün olup olmayacağı denenebilir. Proses farklı demir oksit içerikli atıklar kullanılarak tekrar denenip sonuçlar mevcut çalışma ile karşılaştırılabilir. Elde edilen FTIR sonuçlarına göre geotit fazının varlığı ve yapıdaki hidroksi bağlarının varlığı gösterilmiştir. Yıkama sonrası jel boyutunun empüritelere arındırılması sonrası partikül boyutunun ortalama 161 nm olduğu tespit edilmiş olmakla birlikte aglomerasyon önlenildiğinde boyut dağılımının mezo gözenek boyutlarında olabileceği düşünülmektedir.

Teşekkür

Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Bölümü laboratuvarı uzmanlarından Öğretim görevlisi Fuat KAYIŞ, Sn. Murat KAZANCI, Erkut TAŞ'a ve Arş. Gör. Sezer TAN'a analizler için yaptıkları yardımlardan dolayı teşekkür ederiz.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 11

Kaynaklar

- [1] A. Ghanbariasad, S. M. Taghizadeh, P. L. Show, S. Nomanbhay, A. Berenjian, Y. Ghasemi and A. Ebrahiminezhad, Controlled synthesis of iron oxyhydroxide (FeOOH) nanoparticles using secretory compounds from Chlorella vulgaris microalgae. Bioengineered, 10 (1), 390-396, 2019. <https://doi.org/10.1080/21655979.2019.1661692>.
- [2] M. Mohapatra and S. Anand, Synthesis and applications of nano-structured iron oxides/hydroxides a review. International Journal of Engineering Science and Technology, 2 (8), 127-146, 2011. <https://doi.org/10.4314/ijest.v2i8.63846>.
- [3] M. H. Khedr, K. S. A. Halim and N. K. Soliman, Synthesis and photocatalytic activity of nano-sized iron

- oxides. *Materials Letters*, 63 (6-7), 598-601, 2009. <https://doi.org/10.3390/ijms161024174>.
- [4] A. Jaiswal, S. Banerjee, R. Mani and M. C. Chattopadhyaya, Journal of environmental chemical engineering synthesis, characterization and application of goethite mineral as an adsorbent. *Biochemical Pharmacology*, 1 (3), 281-289, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.05.007>.
- [5] M. Roberts, P. Srivastava, G. Webster, A. J. Weightman and D. J. Sapsford, Biostimulation of jarosite and Iron Oxide-bearing mine waste enhances subsequent metal recovery. *Journal of Hazardous Materials*, 445, 130498, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130498>.
- [6] M. A. Legodi and D. De Waal, The preparation of magnetite, goethite, hematite and maghemite of pigment quality from mill scale iron waste. *Dyes and Pigments*, 74 (1), 161-168, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2006.01.038>.
- [7] M. Raffaella, L. Zoli and E. Sani, Synthesis and characterization of goethite (α -FeOOH) magnetic nanofluids. *International Journal of Thermofluids*, 15, 100169, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2006.01.038>.
- [8] M. Zhao, C. Liu, F. Liu, D. Jing, Y. Dong, L. Wang and L. Ren, Adhesion effect and mechanism of siderophore-producing bacteria onto goethite and boron-doped goethite. *Colloids and Interface Science Communication*, 51, 100680, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.colcom.2022.100680>.
- [9] M. Arakha, S. Pal, D. Samantarrai, T. K. Panigrahi, B. C. Mallick, K. Pramanik, B. Mallick and S. Jha, Antimicrobial activity of iron oxide nanoparticle upon modulation of nanoparticle-bacteria interface. *Scientific Reports*, 5, 14813, 1-12, 2015. <https://doi.org/10.1038/srep14813>.
- [10] T. R. Pisanic, J. D. Blackwell, V. I. Shubayev, R. R. Fiñones and S. Jin, Nanotoxicity of iron oxide nanoparticle internalization in growing neurons. *Biomaterials*, 28 (16), 2572-2581, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2007.01.043>.
- [11] H. Wu, J. J. Yin, W. G. Wamer, M. Zeng and Y. M. Lo, Reactive oxygen species-related activities of nano-iron metal and nano-iron oxides. *Journal of Food and Drug Analysis*, 22 (1), 86-94, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2014.01.007>.
- [12] S. Saqib, M. F. H. Munis, W. Zaman, F. Ullah, S. N. Shah, A. Ayaz, M. Farooq and S. Bahadur, Synthesis characterization and use of iron oxide nano particles for antibacterial activity. *Microscopy Research and Technique*, 82 (4), 415-420, 2018. <https://doi.org/10.1002/jemt.23182>.
- [13] J. Alonso, J. R. Gallego, M. C. Lobo, M. Gil-díaz and D. Baraga, Zero valent iron and goethite nanoparticles as new promising remediation techniques for As-polluted soils. *Chemosphere*, 238, 124624, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124624>.
- [14] W. Li and X. Liu, Applied geochemistry systematic investigations on iron cycling in phosphorus/siderophore systems: Synergism or antagonism?. *Applied Geochemistry*, 124, 104796, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104796>.
- [15] J. K. Yoo, H. J. Kong, R. Wagle, B. H. Shon, I. K. Kim and T. H. Kim, A study on the methods for making iron oxide aerogel. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 72, 332-337, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.12.033>.
- [16] F. E. Huggins, S. Bali, G. P. Huffman and E. M. Eyring, Iron-oxide aerogel and xerogel catalyst formulations: Characterization by ^{57}Fe Mössbauer and XAFS spectroscopies. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 76 (1), 74-83, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2010.02.049>.
- [17] A. Tav, Y. Oz and H. I. Akyıldız, Formation and thermo-physical properties of aerogel ceramic blanket composites synthesized via scalable atmospheric pressure process with methyltrimethoxysilane precursor. *Journal of Porous Materials*, 31(1), 317-334, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10934-023-01521-4>.
- [18] A. Khaleel and A. Al-Marzouqi, Alkoxide-free sol-gel synthesis of aerogel iron-chromium mixed oxides with unique textural properties. *Materials Letters*, 68, 385-387, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2011.11>.
- [19] A. Tav, Y. Öz and H. İ. Akyıldız, Thermal and mechanical properties of sol-gel silica coated fabrics. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 31, 309-319, 2021. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1000774>.
- [20] Ş. Ş. Koçer, Alümina esaslı hammadde ve atıklardan alümina esaslı aerojel tozu üretimi ve karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2019.
- [21] R. Arslan, G. Eğribel, E. Mudam and N. Toplan, Preparation of silica aerogel by ambient pressure drying process using diatomite powder. 19. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi (IMMC2018), sayfa 614-617, İstanbul, Türkiye, 25-27 Ekim 2018.
- [22] K.N. Maamur, U. S. Jais and S. Y. S. Yahya., Magnetic phase development of iron oxide-SiO₂ aerogel and xerogel prepared using rice husk ash as precursor. *AIP Conference Proceedings*, 1217 (1), 2010, <https://doi.org/10.1063/1.3377832>.
- [23] J. W. Jeffrey, M. S. Logan, C. P. Rhodes, E. E. Carpenter, R. M. Stroud and D. R. Rolison, Nanocrystalline iron oxide aerogels as mesoporous magnetic architectures. *Journal of the American Chemical Society*, 126 (51), 16879-16889, 2004. <https://doi.org/10.1021/ja046044f>.
- [24] E. M. Moreno, M. Zayat, M. P. Morales, C.J. Serna, A. Roig and D. Levy, Preparation of narrow size distribution superparamagnetic γ -Fe₂O₃ nanoparticles in a sol-gel transparent SiO₂ matrix. *Langmuir*, 18 (12), 4972-4978, 2002. <https://doi.org/10.1021/la020037s>.
- [25] H. Cui, W. Ren, P. Lin and Y. Liu, Structure control synthesis of iron oxide polymorph nanoparticles through an epoxide precipitation route. *Journal of Experimental Nanoscience*, 8 (7-8), 869-875, 2013. <https://doi.org/10.1080/17458080.2011.616541>.

- [26] D. Vernekar and D. Jagadeesan, Tunable acid-base bifunctional catalytic activity of FeOOH in an orthogonal tandem reaction. *Catalysis Science and Technology*, 5 (8), 4029-4038, 2015. <https://doi.org/10.1039/C5CY00361J>.
- [27] N. H. Dang, T. H. Tu, V. N. P. Linh, L. T. M. Thy, H. M. Nam, M. T. Phong and N.H. Hieu, Preparation of magnetic iron oxide/graphene aerogel nanocomposites for removal of bisphenol A from water. *Synthetic Metals*, 255, 116-106, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2019.116106>.
- [28] L. Tankosić, P. Tančić, S. Sređić and Z. Nedić, Comparative study of the mineral composition and its connection with some properties important for the sludge flocculation process-examples from Omarska Mine. *Minerals*, 8 (3), 119, 2018. <https://doi.org/10.3390/min8030119>.
- [29] K. Shrimali, J. Jin, B.V. Hassas, X.Wang and J.D. Miller, The surface state of hematite and its wetting characteristics. *Journal of colloid and interface science*, 477, 16-24, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.05.030>.
- [30] J. Balachandramohan, M. Kumar, T. Sivasankar and M. Sivakumar, Natural Polymer-Based Iron Oxide (Fe₃O₄) synthesis, characterization and Its application for 1-Amino-Nitrobenzene degradation in assistance with oxidants. *Catalysts*, 12(10), 1161, 2022. <https://doi.org/10.3390/catal12101161>.





Eğilme etkisi altındaki soğukta şekil verilmiş çelik konik çatı kirişlerinin sonlu elemanlar modellemesine etki eden parametrelerin incelenmesi

Investigation of parameters affecting finite element modeling of cold formed steel conical roof beams under bending

Ramazan Oruç^{1,*}, Mehmet Emin Kara²

^{1,2} Aksaray Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 68100, Aksaray Türkiye

Öz

Bu çalışmada soğukta şekil verilmiş çelik kiriş elemanların doğrusal olmayan nümerik modellemesinin deneysel veriler ile doğrulanması amaçlanmıştır. C harfi formunda kesiti olan kirişlerden oluşturulan ve konik çatıya benzetilen deney elemanı test edilmiştir. Nümerik çalışmada ise deney elemanları farklı ağ tipleri, boyutları ve büyütme katsayıları kullanılarak modellenmiştir. Ayrıca, global ve lokal geometrik kusurlar gibi değişkenlerin analize etkisi değerlendirilmiş ve model doğrulanmıştır. Belirlenen modelin analizlerinden elde edilen sonuçlar, deneyde elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Analitik modelin doğrulanmasında global kusurların tek başına yeterli olmadığı, lokal etkilerin de tanımlanması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Soğukta şekil verilmiş çelik, Eğilme elemanı, Sonlu elemanlar yöntemi, Geometrik kusur

1 Giriş

Soğukta şekil verilmiş çelik elemanlar günümüzde silolar, sanayi yapıları ve konutlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Geleneksel haddeleme ile üretilen çelik profillerin aksine soğukta şekil verilmiş elemanlar oda sıcaklığında rulo şekillendirme makinesi veya abkant büküm makineleri ile kolay üretilmektedir. İstenilen geometrinin sağlanması, yüksek dayanım-ağırlık oranına sahip olması, minimum %25 geri dönüştürülmüş üründen elde edildiği için de sürdürülebilir olması gibi birçok avantajları bulunmaktadır [1-3]. C ve Z harfi formundaki kesitler çatı aşıklarında, döşemelerde ve kolon, kiriş elemanlarında kullanılmaktadır. Öte yandan soğukta şekil verilmiş çelik elemanlar ince cidarlı ürünler olduğu için ($t < 6.35$ mm) lokal, distorsiyonel ve yanal burulmalı burkulma göçme modlarına ve bu burkulma modlarının birbiri ile etkileşimine yatkındır [4]. C harfi formunda olan kesitlerin asal eksene göre simetrik olmaması geometrik merkez ile kayma merkezinin örtüşmemesine neden olmaktadır. Eğilme etkisindeki açık kesitlerde yük aktarımı kayma merkezinden sağlanmadığı için kesit hem burulma momentinin hem de eğilme momentinin etkisi ortaya çıkmakta ve yanal burulmalı burkulma davranışı baskın olmaktadır [2,5]. Yanal burulmalı burkulma etkisindeki kiriş düzlem dışı eğilme yaparak stabilitesini kaybetmekte ve kapasitesi azalmaktadır. İlave

Abstract

This study aims to verify the nonlinear numerical modeling of cold-formed steel beam members with experimental data. An experimental member formed by beams with a C-section and modeled as a conical roof was tested. In the numerical study, the experimental elements were modeled using different mesh types, sizes and amplification factors. In addition, the effect of parameters such as global and local geometric imperfections on the analysis is evaluated and the model is validated. The results obtained from the specified model analysis are compared with those obtained in the experiment. It is concluded that global imperfections alone are insufficient to validate the analytical model and local effects should also be identified.

Keywords: Cold formed steel, Bending member, Finite element method, Geometric imperfection

çözüm yöntemleri ile bu durumun tahmin edilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple, yanal burulmalı burkulma davranışı birçok araştırmacının ilgisini çekmiş ve davranışın belirlenebilmesi için analitik ve nümerik modeller oluşturulmuştur [6-10]

Yazılım sektörünün gelişmesiyle birlikte sonlu elemanlar yönteminin kullanımı artmış, büyük doğrulukla gerçek davranışın incelenmesine olanak sağlanmıştır [11]. Yüksek doğrulukla çözüm yapan yazılımlardan bir tanesi de ABAQUS programıdır [12]. Literatür incelendiğinde birçok araştırmacı tarafından [13-19] eğilme etkisi altındaki elemanların incelenmesinde kullanılmıştır. Ancak, sonlu elemanlar modeli ile tahmin edilen taşıma gücü değerlerinin doğruluğunu kontrol edebilmek amacıyla tek başına kullanılmaktansa gerek deney sonuçları gerekse standart kapasite hesaplamaları ile kıyaslanarak doğrulama yapılması önerilmektedir.

Soğukta şekil verilmiş çelik elemanlardaki geometrik kusurlar, kusursuz geometriden sapmaları ifade etmektedir. Geometrik kusurlar, soğukta şekil verilmiş çelik elemanlarda rulolama işlemi ve şekil verme işlemleri gibi imalat aşamalarında, depolama ve nakliye süreçlerinde ve uygulama süreçlerindeki işlemler sonucunda meydana gelebilmektedir. Söz konusu geometrik kusurlar ise yapı elemanlarının burkulma davranışını ve yük taşıma

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ramazanoruc@aksaray.edu.tr. (R. Oruç)

Geliş / Received: 05.12.2023 Kabul / Accepted: 01.03.2024 Yayımlanma / Published: 15.04.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1400650

kapasitesini etkileyen önemli parametrelerdendir [20-22]. Özellikle sonlu elemanlar modellemelerinde geometrik kusurların tanımlanması, soğukta şekil verilmiş çelik elemanların davranışının belirlenmesinde gerekli olmaktadır. Çünkü, kusursuz modelde gerçek davranışın incelenmesi mümkün olmamaktadır.

Yapılan çalışmalarda [23,24], araştırmacılar farklı ağ tiplerinin, boyutlarının ve lokal geometrik kusurların sonlu elemanlar modeline olan etkisini incelemiştir. Ağ boyutlarının sıklaştırılması hem çözüm sürelerinin uzamasına hem de depolanan dosya boyutunun artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle çok sık ağ boyutları tercih edilmemiştir. Ayrıca, yüksek oranda kusur verilen modellerin deneysel sonuçlardan çok uzaklaştığı, daha düşük kusur verilen modellerin daha doğru sonuç verdiği belirtilmiştir.

Literatürdeki araştırmalar incelendiğinde, sonlu elemanlar modellerinin oluşturulmasında geometrik kusurların etkisi üzerine yapılan çalışmaların çoğunda lokal kusurların ele alındığı, ancak global kusurları göz ardı edildiği görülmektedir. Bu amaçla çalışmada model oluşturma aşamasında öncelikle farklı büyütme katsayılarına sahip global kusurların etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Daha sonra, en etkili büyütme katsayısına sahip global kusurun etkisi göz önüne alınarak, farklı büyütme katsayılarına sahip lokal kusurların süperpozisyon ile birleştirilerek model üzerindeki etkisi değerlendirilmiş ve deneysel çalışma ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, ağ model tipleri ve boyutlarının etkisi de detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

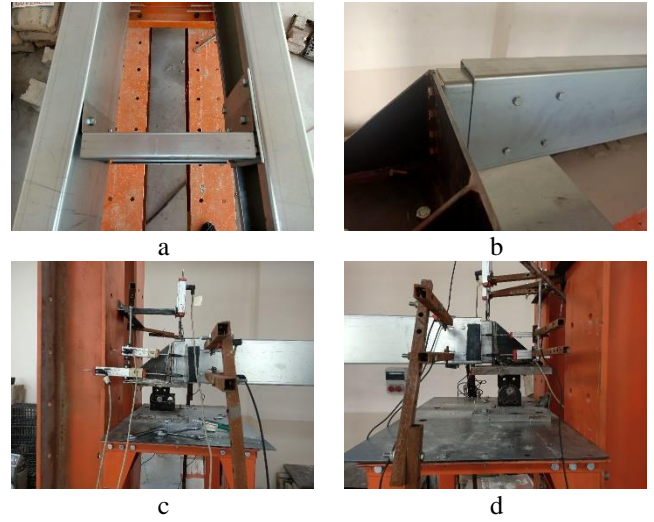
2 Materyal ve metot

2.1 Deneysel program

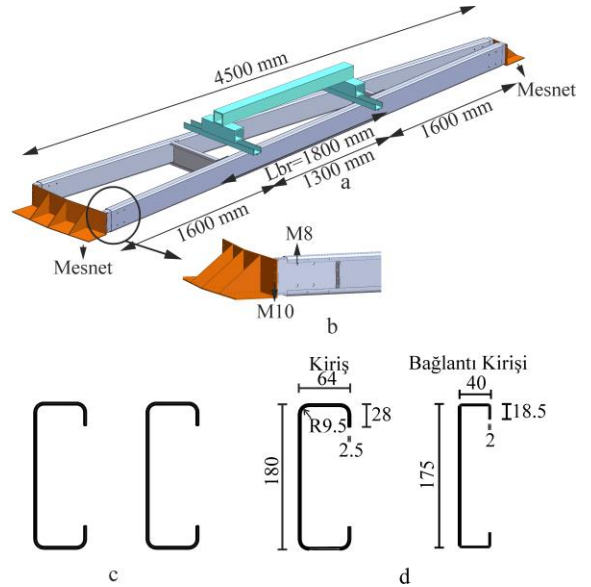
Konik silo çatılarında aralarında açı bulunan kirişler kullanılmaktadır. Kullanımı en yaygın olan silonun yarıçapı 9 m'dir. Bu amaçla deneysel çalışmada, 1/2 ölçekli, 4.5 m uzunluğunda, tek açıklıklı ve soğukta şekil verilmiş çelik elemanlardan oluşan bir kiriş sistemi tasarlanmıştır. Laboratuvar deneylerinde C-180x64x28-2.5 olarak isimlendirilen kirişler, C-175x40x18.5-2 olarak isimlendirilen bağlantı kirişleri yardımıyla birbirlerine ve uç bağlantı elemanları ile de mesnetlere konik silo çatısındaki form verebilmek için 9°'lik açı ile bağlanmıştır. Kirişler aynı yönlü olacak şekilde düzenlenmiştir. Elemanların birbirlerine bağlanmasında bulonlu birleşim kullanılmıştır. Kirişlerin birbirlerine ve uç bağlantı elemanlarına bağlanmasında M8 bulonlar kullanılırken uç bağlantı elemanlarının mesnetlenmesinde M10 bulonlar kullanılmıştır. Bulonların kalite sınıfı 8.8'dir. Kirişlerin birbirine bağlanması ve mesnetlenmesi Şekil 1 (a-d)'de verilmiştir. Kirişlerin yerleşimi, kiriş bağlantı detayı ve kirişlere ait enkesit özellikleri Şekil 2 (b-d)'de verilmiştir.

Deneysel çalışmada kirişler, birbirlerine mesafesi 1800 mm olan bağlantı kirişleri ile yanal olarak desteklenmiştir. Yükleme ara mesafesi 1300 mm olan reaksiyon kirişi ile iki noktadan yapılmıştır. Deneysel düzeneği şematik olarak Şekil 2a'da ve deneysel elemanın laboratuvar ortamındaki görüntüsü Şekil 3a'da verilmiştir. Böylece deneysel elemanda göçmenin sabit moment bölgesinde gerçekleşmesi

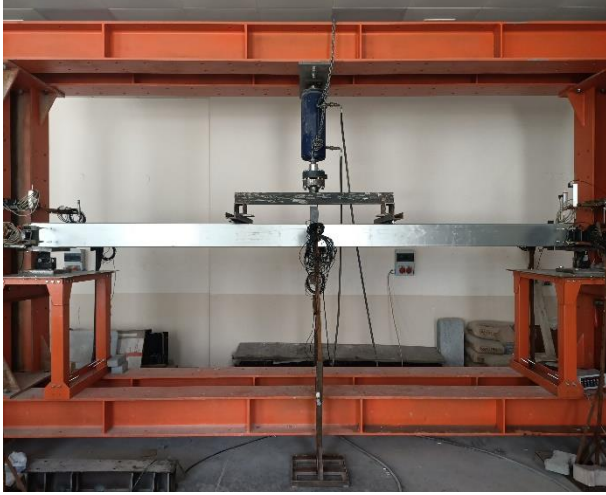
amaçlanmıştır. Ayrıca, yükleme esnasında lokal ezilmelerin önüne geçebilmek için yükleme noktalarında kesitin içine 80x50x175 mm boyutlarında ahşap takozlar yerleştirilmiştir (Şekil 3d). Yükleme 500 kN kapasiteli bir hidrolik kriko ve el kumandalı hidrolik pompa aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Yük artım hızı 0.25 kN/sn'dir. Uygulanan yük 100 kN kapasiteli bir yük hücresiyle ölçülmüştür. Teste göçme gerçekleşene kadar devam edilmiştir. Deplasman ölçümleri potansiyometrik cetveller ile gerçekleştirilmiştir. Kirişlerin orta noktasından bir adet düşey, iki adet yatay deplasman, mesnet çökmeleri ve mesnet dönmeleri olacak şekilde deplasman ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deplasman ölçümlerinin laboratuvar ortamındaki görüntüsü Şekil 3 (b-c)'de verilmiştir.



Şekil 1. a) Kirişlerin bağlantı kirişleri ile bağlanması, b) kirişlerin uç bağlantı elemanı ile mesnetlenmesi, c-d) deneysel elemanın mesnetlenmesi.



Şekil 2. a) Deneysel düzeneğin şematik gösterimi b) kirişlerin uç bağlantı elemanları ile mesnetlere bağlantı detayı c) kirişlerin yerleşimi d) kirişlerin ve bağlantı kirişlerinin kesit özellikleri.



a



b



c



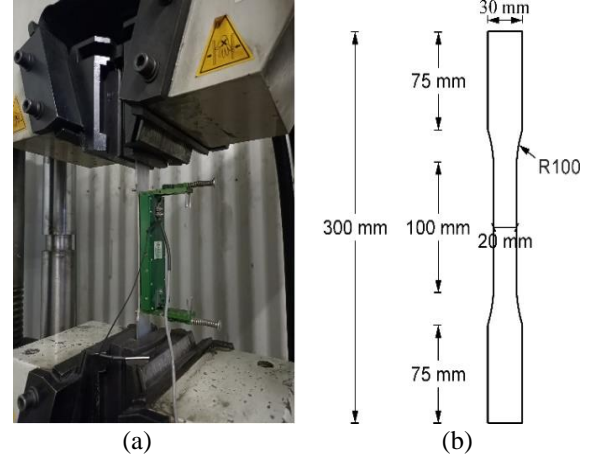
d

Şekil 3. a) Deney düzeneği ve ölçüm sisteminin görünüşü b) orta nokta düşey ve yanal deplasman ölçümleri c) mesnet düşey ve yanal deplasman ölçümleri d) kesit içine ahşap takoz yerleştirilmesi.

2.2 Malzeme özellikleri

Deney elemanları DX51D sınıfında sıcak daldırılmış galvanizli çelik malzemeden üretilmiştir. Deney elemanlarının gövdelerinin düz bölgesinden alınan numuneler test edilmiştir. Çekme testi ASTM E8/E8M-13a'ya [25] uygun olarak yapılmıştır. Tüm çekme numuneleri 600 kN kapasiteli 0,01 mm/sn yükleme hızlı çekme test cihazı ile çekilmiştir (Şekil 4). Uzama 100 mm

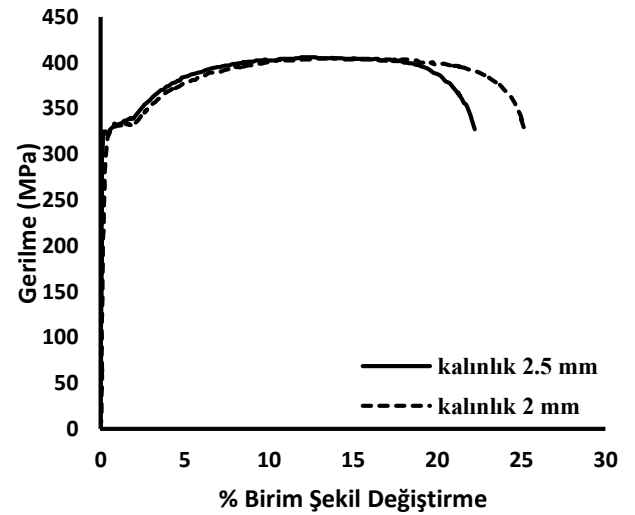
boyunda ekstansometre ile ölçülmüştür. Kupon elemanların Gerilme-Birim şekil değiştirme grafiği Şekil 5'te ve mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 4. Çekme testi a) çekme test numunesi b) çekme elemanlarının geometrisi.



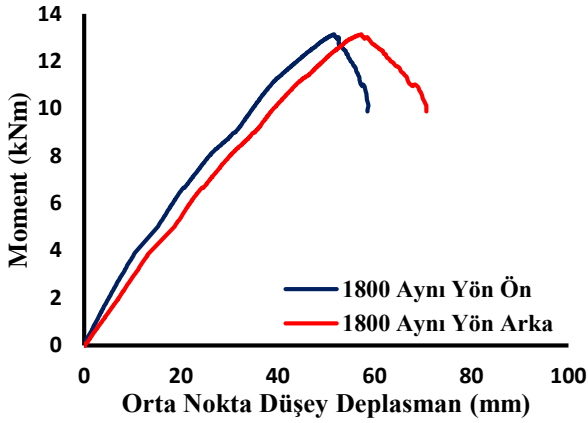
Şekil 5. Çekme elemanlarının ortalama gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.

Tablo 1. Soğukta şekil verilmiş çelik elemanların mekanik özellikleri

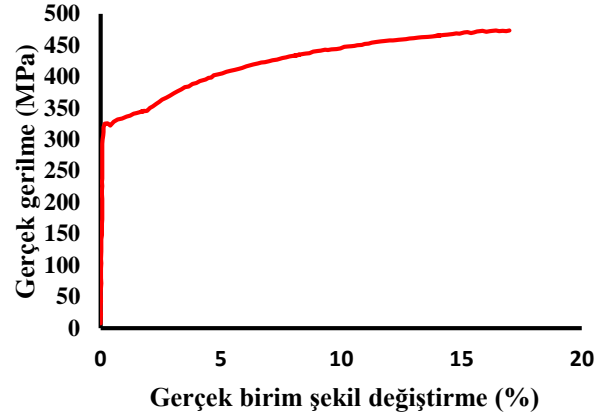
Kalınlık (mm)	E_s (GPa)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ϵ_f (%)
2	202.8	326.5	331.15	25.1
2.5	198.8	321.6	326.7	22.2

2.3 Deney sonucu

Deney elemanına yük dört noktadan 0.25 kN/sn yük artırımı hızıyla uygulanmıştır. Yük 13.1 kNm moment düzeyine kadar artmış rijitliğin azalmasıyla yük de düşmüştür. Deney elemanında göçme yanal burulmalı burkulma ve kiriş gövdesinde lokal burkulma oluşmasıyla gerçekleşmiştir. Deney elemanına ait moment-düşey deplasman grafiği Şekil 6'da ve göçme şekli Şekil 7 (a-b)'de verilmiştir.



Şekil 6. Deneysel eleman için moment-düşey deplasman grafiği



Şekil 8. Model için üretilen gerçek gerilme-gerçek birim şekil değiştirme grafiği



Şekil 7. Deneysel elemanın göçme şekli.

3 Sonlu elemanlar analizi

Deneysel elemanın sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında ABAQUS yazılımı kullanılmıştır. Modelinin taşıma gücü ve göçme modu tahminini geliştirebilmek amacıyla farklı ağ boyutları ve ağ türleri kullanılmıştır. Ayrıca, sonlu elemanlar modeline global ve lokal kesit kusurları tanımlanarak analiz hassasiyeti geliştirilmeye çalışılmıştır.

3.1 Malzeme özellikleri

Sonlu elemanlar analizlerinde malzeme özelliklerinin tam olarak yansıtılması için gerçek gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinin tanımlanması gerekmektedir. Bu nedenle, sonlu elemanlar modellemesinde kullanılan malzeme özellikleri çekme testleri sonucunda elde edilen mühendislik gerilme değerlerinin gerçek gerilme değerlerine dönüştürülmesiyle elde edilmiştir. Gerçek gerilme değerlerinin elde edilmesinde Denklem (1,2)'deki dönüşümlerden yararlanılmıştır. Kirişler için elastisite modülü 200000 MPa ve akma dayanımı 322 MPa olarak elastik-plastik malzeme modeli uygulanmıştır. 2.5 mm kalınlığındaki kirişler için gerçek gerilme-gerçek birim şekil değiştirme (%) grafiği Şekil 8'de verilmiştir.

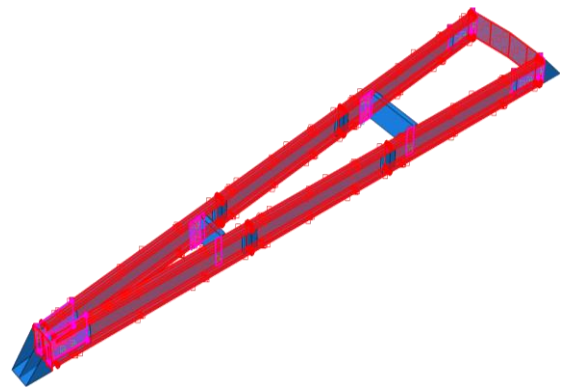
$$\sigma_t = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (1)$$

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon) - \frac{\sigma_t}{E} \quad (2)$$

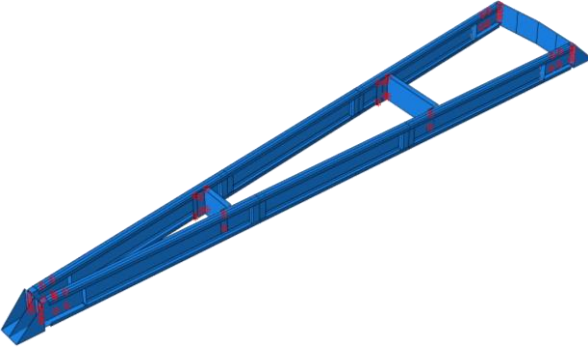
σ : mühendislik gerilmesi, ε : mühendislik birim şekil değiştirilmesi, E : elastisite modülü, ε_t : gerçek birim şekil değiştirilmesi ve σ_t : gerçek gerilmeyi ifade etmektedir.

3.2 Mesnet şartları ve temas yüzeyleri

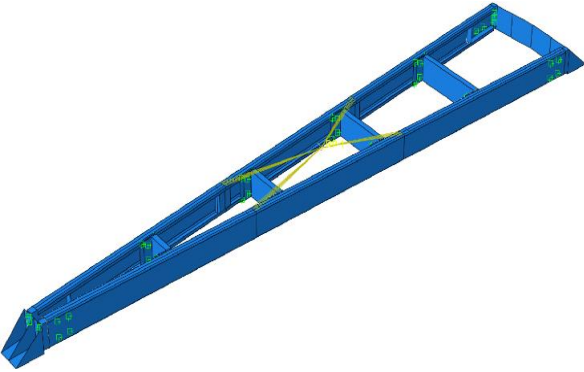
Sonlu elemanlar modellemesinde mesnet şartları basit mesnetli olarak modellenmiştir. Modelde yükleme plakasına eş değer olacak şekilde kiriş sisteminin orta noktasında "reference point" tanımlanmış ve yükleme noktalarına "coupling" ile bağlanmıştır. "Coupling" davranışı için "Structural Coupling" seçilmiştir. Yükleme noktalarının altına deneyde olduğu gibi erken oluşabilecek burkulmaların engellenmesi için rijit ahşap bloklar oluşturulmuş, "Tie" bağlantı kullanılarak kirişe yerleştirilmiştir. "Contact" özelliklerinde ise "Allow separation after contact" özelliği aktif edilerek "Hard Contact" ve "Penalty" seçilerek sürtünme katsayısı olarak 0.3 kullanılmıştır. Bağlantı kirişleri ile kirişlerin, kirişler ile uç bağlantı elemanlarının ve uç bağlantı elemanları ile mesnet levhalarının arasında oluşan temas yüzeylerinin tanımlanmasında "Surface to Surface" ve "Finite sliding" bağlantı modeli kullanılmış ve Şekil 9'da gösterilmiştir. Bulonlu birleşimlerin tanımlanması "point-based fastener" olarak modellenerek ABAQUS kütüphanesinde bulunan 3 serbestlik derecesine sahip "Cartesian" bağlantı elemanı olarak tanımlanmıştır. Kirişlerin birbirine bağlanmasında kullanılan bulonların modellenmesinde fiziksel yarıçap 4 mm olarak tanımlanırken uç bağlantı elemanı ve mesnet levhasındaki bulonlu birleşimde fiziksel yarıçap 5 mm olarak tanımlanmıştır (Şekil 10). Oluşturulan sonlu elemanlar modeli Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 9. Temas yüzeylerinin modellenmesi



Şekil 10. Bulonlu birleşimlerin modellenmesi



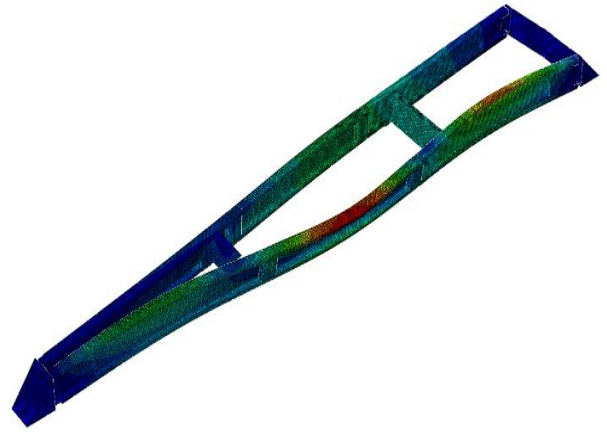
Şekil 11. Oluşturulan sonlu elemanlar modeli

3.3 Ağ (Mesh) modeli

Deney elemanını oluşturan kirişler kabuk eleman "Shell" olarak tanımlanmıştır. Modellemenin doğruluğu ve işlem süresi dikkate alınarak erken oluşabilecek lokal burkulmaların engellenmesi için yerleştirilen ahşap bloklar için sekiz düğüm noktasına sahip azaltılmış integrasyon tekniği ile üç boyutlu katı eleman "C3D8R" kullanılmıştır. Kirişlerin modellenmesinde farklı ağ modellerinin etkisini incelemek için S4R ve S4 ağ modelleri ile kurulan modeller karşılaştırılmıştır. S4R ağ modeli dört düğüm noktasına sahip, azaltılmış integrasyon tekniği olan ve "large-strain" formülasyonuna sahiptir. Ancak S4 ağ modelinde ise azaltılmış integrasyon tekniği yoktur. Ayrıca 5, 10, 15 ve 20 mm olan farklı ağ boyutlarının etkileri incelenmiştir.

3.4 Analiz yöntemi

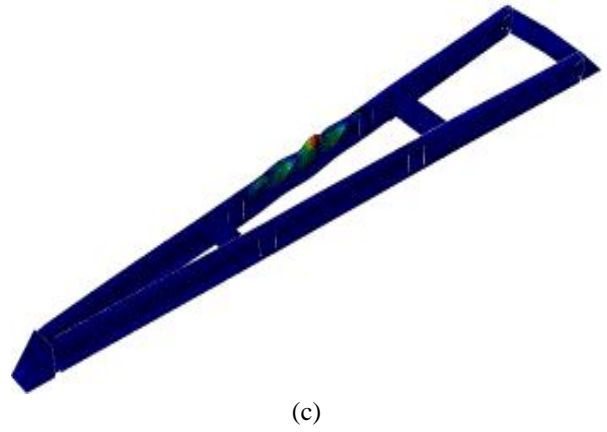
Kiriş sisteminin burkulma modlarının tespit edilebilmesi için öncelikle burkulma analizi "linear perturbation buckling" yapılmıştır. Bu analiz sonucunda deney elemanına ait baskın lokal ve global burkulma modları elde edilmiştir. Kiriş sistemine ait global ve lokal burkulma modları sırasıyla Şekil 12 (a) ve (b-c)'de verilmiştir. Lokal burkulma modları birleştirilerek geometrik kusurların işlenmesinde uygulanmıştır. Geometrik kusurlar model komut satırına "*Imperfection" komutunun girilmesiyle tanımlanmıştır. Burkulma modlarının belirlenmesinin ardından, yüklemeye kiriş sisteminin ortasında tanımlanan "reference point" üzerinden deplasman kontrollü olarak ve doğrusal olmayan geometri "NLGEOM" parametresinin açık olduğu statik "Static" analiz yapılmıştır. Statik analizde maksimum artış sayısı, ilk, minimum ve maksimum artış genişliği sırasıyla 100000, 0.01, 10-15 ve 0.1 olarak belirlenmiştir.



(a)



(b)



(c)

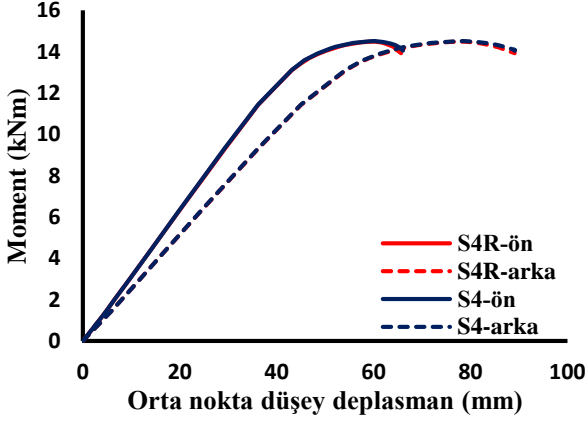
Şekil 12. Burkulma analizi sonucunda elde edilen kirişin baskın burkulma modları (a) global burkulma (b-c) lokal burkulma

4 Bulgular

4.1 Ağ modeli

Kirişlerin modellenmesinde, farklı ağ modellerinin etkisini incelemek için S4R ve S4 ağ modellerinin moment-orta nokta düşey deplasman davranışına olan etkisi incelenmiştir (Şekil 13). Bu ağ modelleri sonlu membran şekil değiştirmelerini ve büyük dönmeleri dikkate aldığı için modelde uygulanmıştır. Öte yandan, başka bir kabuk türü ve daha ekonomik bir ağ modeli olan S4R5 küçük şekil değiştirmelere ve büyük dönmelere neden olduğundan

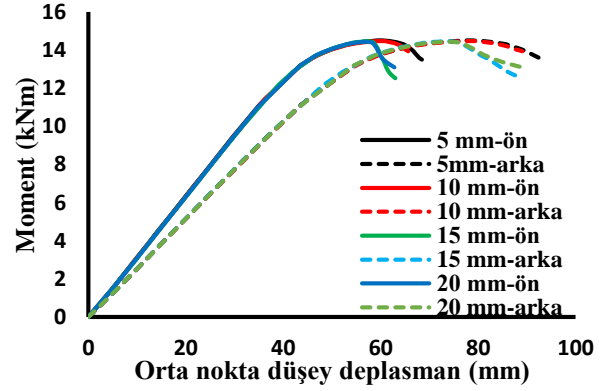
uygulanamamıştır. S4R ve S4 ağ modelleri incelendiğinde benzer bir moment-deplasman davranışı göstermiştir. Ağ modelleri için moment kapasitesi sırasıyla 14.48 kNm ve 14.51 kNm elde edilmiştir. Ancak, azaltılmış integrasyon uygulaması üç boyutlu modellemelerde daha doğru sonuç verdiği için S4R ağ modeli uygulanmıştır.



Şekil 13. S4R ve S4 ağ modellerinin karşılaştırılması

4.2 Ağ boyutları

Farklı ağ boyutlarının etkisini incelemek amacıyla, kiriş elemanların modellenmesinde 5, 10, 15 ve 20 mm boyutlarında ağ kullanılmış, S4R ağ modeli ile analiz yapılmıştır. Karşılaştırmada ön ve arka kirişlere ait moment-orta nokta düşey deplasman grafiği dikkate alınmış ve Şekil 14'te verilmiştir. Dört farklı ağ boyutu kullanımıyla moment taşıma kapasiteleri sırasıyla 14.50, 14.48, 14.47 ve 14.45 kNm olarak hesaplanmıştır. Moment taşıma kapasitelerinde çok büyük farklılıklar olmasa da ağ boyutlarına ait moment-deplasman davranışları değişiklik göstermektedir. 5 ve 10 mm benzer moment-deplasman davranışları sağlarken 15 ve 20 mm'lik modeller de kendi içerisinde benzerlik göstermektedir. Ancak, ağ boyutlarının daha sık olması hem analiz süresini hem de depolanan dosyanın boyutunu artırmaktadır. Bu da büyük modellerin analizinde bilgisayar kullanımını sınırlamaktadır. Yapılan analizler ağ boyutlarına göre sırasıyla 35973, 23586, 4400.5 ve 4029.6 cpu sürelerinde tamamlanmıştır. 20 mm'den 5 mm'ye ağ boyutlarının düşürülmesiyle yaklaşık 9 kat işlem süresinde artış meydana gelmiştir. 15 ve 20 mm ağ boyutlarındaki analizlerde hem moment-deplasman grafiğinde maksimum moment kapasitesine erişildikten sonra ani bir yük kaybıyla göçme meydana gelmesi hem de daha büyük ağ boyutlarının analiz sonucunda tutarlı olmasını kısıtlayacağı için bu boyutlar dikkate alınmamıştır. Ayrıca, 5 ve 10 mm ağ boyutlarından ise cpu süreleri dikkate alınarak daha uygulanabilir sonuç elde edildiği için 10 mm'lik ağ boyutları tercih edilmiştir.



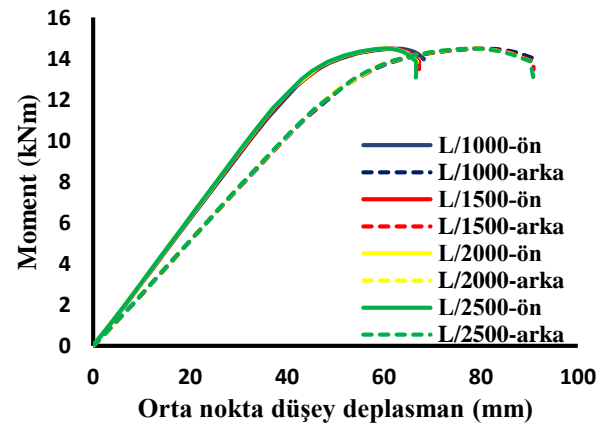
Şekil 14. Ağ boyutlarının karşılaştırılması

4.3 Geometrik kusurlar

Ağ modelinin ve ağ boyutlarının analizlere olan etkisi tespit edildikten sonra geometrik kusurların modele olan etkisi incelenmiştir. Deney elemanında global ve lokal burkulma baskın olduğundan modellemelerde burkulma analizi sonucu elde edilen global ve burkulma modları farklı büyütme katsayıları kullanılarak Denklem (3)'teki gibi etki edilmiştir [5].

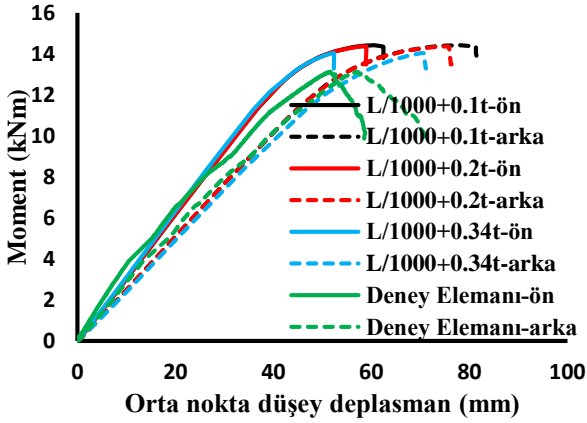
$$\Delta x_i = w_i \phi_i \quad (3)$$

Burada x_i : geometrik kusuru, w_i : büyütme katsayısını ve ϕ_i : i 'nci mod şeklini ifade etmektedir. Şekil 12 (a)'de verilen global burkulma modu L/1000, L/1500, L/2000 ve L/2500 farklı büyütme katsayıları ile büyütülerek analizi yapılmış ve moment-orta nokta düşey deplasman grafiğinde Şekil 15'te karşılaştırılmıştır. Büyütme katsayılarına göre modellerin maksimum moment kapasiteleri sırasıyla 14.48, 14.48, 14.48 ve 14.49 kNm olarak elde edilmiştir. Modellerde global burkulma büyütme katsayılarının hem maksimum moment seviyelerinde hem de moment-orta nokta düşey deplasman davranışlarında çok önemli bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Bu sebeple global burkulma modu etkisinin tek başına yeterli olmadığı lokal burkulma modları ile birleştirilerek modele kusur verilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Lokal kusurlar dahil edilirken L/1000 global büyütme katsayısı ile birleştirilerek kullanılmıştır.

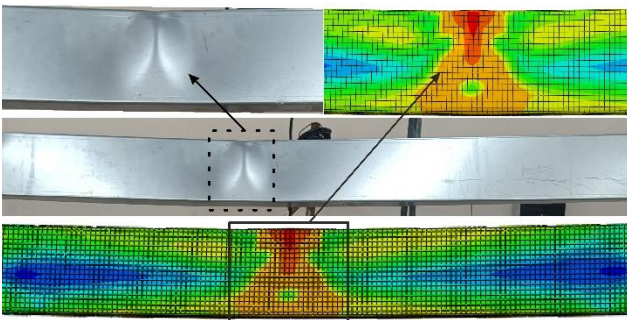


Şekil 15. Global burkulma için büyütme katsayılarının karşılaştırılması.

Şekil 12 (b-c)'de burkulma analizi sonucunda her bir kiriş için ayrı ayrı elde edilen lokal burkulma modları süperpozisyon ile birleştirilerek farklı büyütme katsayıları (0.1t, 0.2t ve 0.34t) kullanılarak analiz yapılmıştır. Lokal kusurların tanımlanmasında kesit kalınlığı dikkate alınmıştır. [22] kümülatif dağılım fonksiyonunda (cdf) aşılma olasılığı %50 olan 0.34t katsayısı maksimum büyütme katsayısı hedefi olarak belirlenmiştir. Farklı büyütme katsayılarının etkisi moment-orta nokta düşey deplasman grafiği olarak Şekil 16'da deney elemanı ile karşılaştırılarak verilmiştir. Modellerde elde edilen maksimum moment seviyeleri sırasıyla 14.42, 14.36 ve 14.0 kNm olarak elde edilmiştir. Deney elemanı ile kıyaslandığında 0.1t ve 0.2t büyütme katsayılı modellerde maksimum moment oranı (M_{fea}/M_{den}) %10 dolaylarındadır. 0.34t büyütme katsayısının uygulandığı modelde ise yaklaşık %7'dir. Bu sebeple 0.34t büyütme katsayılı model ile daha doğru sonuç elde edilmiştir. Ayrıca, deney elemanının göçme modu ile 0.34t büyütme katsayılı modelin göçme modu uyum içerisindedir (Şekil 17).



Şekil 16. Global ve lokal burkulma modlarının birleşik etkisi



Şekil 17. Deney elemanı ile sonlu elemanlar modelinin göçme modları karşılaştırılması

5 Sonuçlar

Bu çalışmada soğukta şekil verilmiş kirişlerden oluşan deney elemanının modellenmesinde ağ modeli, ağ boyutu ve geometrik kusurların etkisi incelenmiştir. Ağ modeli tipleri karşılaştırıldığında, S4R ağ modelinde azaltılmış entegrasyon uygulaması ile üç boyutlu modellemelerde S4 ağ modeline göre daha doğru sonuç verdiği için tercih

edilmiştir. Ağ boyutlarının azalmasıyla bilgisayar çözüm süresinde yaklaşık 9 kat yavaşlama meydana gelmiştir. Bu sebeple de en yoğun ağ boyutu ile modelin oluşturulması uygulanabilir olmaktan çıkmaktadır. Geometrik kusurların etkisi dikkate alındığında, tek başına global burkulma modunun farklı büyütme katsayıları ile modele kusurun verilmesinde moment-deplasman grafiğinde önemli bir değişiklik yapmadığı belirlenmiştir. Global burkulma modu ile lokal burkulma modlarının birleştirilmesiyle hem moment-deplasman ilişkisinde hem de göçme modunun karşılanmasında en etkili yaklaşım L/1000+0.34t büyütme katsayısında olmuştur.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %8

Kaynaklar

- [1] W-W Yu, R.A. LaBoube and H. Chen, Cold-formed steel design. Wiley, Hoboken, 2019.
- [2] G. J. Hancock, T. Murray, and D. S. Ellifrit, Cold-formed steel structures to the AISI specification. CRC Press, Madison Avenue, 2001.
- [3] L. W. Williams, 1 - Introduction to recent trends in cold-formed steel construction. In: C. Yu. (editor) Recent Trends in Cold-Formed Steel Construction, Woodhead Publishing; 2016, p. 1-35. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100160-8.00001-3>.
- [4] Y. Bölükbaş, Güncel tasarım standartlarına göre soğukta şekil verilmiş çelik kesitlerin eğilme dayanımlarının hesabı. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13(1), 1-1, 2024. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1309045>
- [5] S. Selvaraj and M. Madhavan, Bracing effect of sheathing in point-symmetric cold-formed steel flexural members. Journal of Constructional Steel Research, 157, 450-462, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.02.037>
- [6] L. Y. Li, Lateral-torsional buckling of cold-formed zed-purlins partial-laterally restrained by metal sheeting. Thin-walled structures, 42(7), 995-1011, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2004.03.005>
- [7] P. Nandini and V. Kalyanaraman, Strength of cold-formed lipped channel beams under interaction of local, distortional and lateral torsional buckling. Thin-walled structures, 48(10-11), 872-877, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2010.04.013>
- [8] B. Janarthanan and M. Mahendran, Behaviour and strength of unlipped channel sections under combined bending and torsion. Journal of Constructional Steel Research, 182, 106648, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106648>
- [9] H. X. Wan, B. Huang and M. Mahendran, Experiments and numerical modelling of cold-formed steel beams under bending and torsion. Thin-Walled Structures, 161, 107424, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107424>
- [10] R. H. Plaut and C. D. Moen, Lateral-torsional deformations of single-span and two-span thin-walled

- beams with continuous bracing. *Journal of Constructional Steel Research*, 179, 106534, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106534>
- [11] C. Zhao, Investigations on structural interaction of cold-formed steel roof purlin-sheet system. Ph.D. Thesis, University of Birmingham, UK, 2014.
- [12] ABAQUS Analysis User's Manual-Version 6.14., ABAQUS Inc., USA, 2018
- [13] C. Yu and B.W. Schafer, Simulation of cold-formed steel beams in local and distortional buckling with applications to the direct strength method. *Journal of Constructional Steel Research*, 63, 5, 581-590, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.07.008>.
- [14] N. D. Kankanamge and M. Mahendran, Behaviour and design of cold-formed steel beams subject to lateral-torsional buckling. *Thin-Walled Structures*, 51, 25-38, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2011.10.012>.
- [15] M. R. Haidarali and D.A. Nethercot, Local and distortional buckling of cold-formed steel beams with edge-stiffened flanges. *Journal of Constructional Steel Research*, 73, 31-42, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.01.006>.
- [16] M. Anbarasu, Local-distortional buckling interaction on cold-formed steel lipped channel beams. *Thin-Walled Structures*, 98, 351-359, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.10.003>.
- [17] M. Anbarasu, Local-distortional buckling interaction on cold-formed steel lipped channel beams. *Thin-Walled Structures*, 98, 351-359, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.10.003>
- [18] Q. Y. Li and B. Young, Structural performance of cold-formed steel built-up section beams under non-uniform bending. *Journal of Constructional Steel Research*, 189, 107050, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.107050>
- [19] K. Roy, H. H. Lau, T. C. H. Ting, B. Chen, and J. B. Lim, Flexural behaviour of back-to-back built-up cold-formed steel channel beams: Experiments and finite element modelling. *Structures*, 29, 235-253, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.10.052>
- [20] D. Dubina and V. Ungureanu, Effect of imperfections numerical simulation of instability behaviour of cold-formed steel members. *Thin-walled structures*, 40, 3, 239-262, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0263-8231\(01\)00046-5](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(01)00046-5)
- [21] V. M. Zeinoddini and B. W., Schafer, Simulation of geometric imperfections in cold-formed steel members using spectral representation approach. *Thin-Walled Structures*, 60, 105-117, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2012.07.001>
- [22] B. W. Schafer and T. Peköz, Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses. *Journal of Constructional Steel Research*, 47, 193-210, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(98\)00007-8](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(98)00007-8).
- [23] C. H. Pham and G. J. Hancock, Numerical simulation of high strength cold-formed purlins in combined bending and shear. *Journal of Constructional Steel Research*, 66, 1205-17, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.04.014>.
- [24] P. Natario, N. Silvestre and D. Camotim, Computational modelling of flange crushing in cold-formed steel sections. *Thin-Walled Structures*, 84, 393-405, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.07.006>
- [25] ASTM E8/E8M-13a, Standard test methods for tension testing of metallic materials. West Conshohocken, 2013.





Electric fish optimization for economic load dispatch problem

Ekonomik yük dağıtım problemi için elektrik balığı optimizasyonu

Yağmur Arıkan Yıldız¹ , Özge Pınar Akkaş^{2,*} , Mustafa Saka³ , Melih Çoban⁴ ,
İbrahim Eke⁵ 

¹ Sivas University of Science and Technology, Electrical and Electronics Engineering Department, 58000, Sivas, Türkiye

^{2,5} Kırıkkale University, Electrical and Electronics Engineering Department, 71450, Kırıkkale, Türkiye

³ Iskenderun Technical University, Electrical and Electronics Engineering Department, 31200, Iskenderun, Hatay, Türkiye

⁴ Bolu Abant İzzet Baysal University, Electrical and Electronics Engineering Department, 14030, Bolu, Türkiye

Abstract

The Economic Load Dispatch (ELD) problem is an essential aspect of power system planning and operational scheduling. Different techniques and algorithms have been recommended to solve it, aiming to minimize the cost of power generation with satisfying the load requirements. In this paper, a new algorithm called Electric Fish Optimization (EFO) is used to solve the ELD problem by considering the line losses, ramp rate limits, maximum and minimum capacities of the generators and prohibited operating zones (POZ). The algorithm has been utilized in test systems consisting of 6 and 15 units and its outcomes have been compared to those from previous research studies. The proposed algorithm has been shown to achieve minimum cost, indicating its superiority and effectiveness in addressing power system planning challenges. It is evident that the presented algorithm offers a valuable solution for optimizing ELD problems.

Keywords: Economic load dispatch, Electric fish optimization, Power systems

1 Introduction

Energy is an indispensable source of human life. From primitive times to the present day, the diversity, production and consumption of energy resources have followed an increasing development in parallel with the increasing needs of human beings. Especially after the industrial revolution, the demand for energy increased even more. In addition, while energy was abundant and cheap before the 1973s, energy prices rose rapidly due to the oil crisis in the 1973s [1].

Today, with the developing technology, energy is the most fundamental factor of economic and social development and has become the most important factor guiding the world economy and policies. Due to the ever-increasing energy need, maintaining the balance between energy production and consumption and the import of energy resources by many countries are the most important problems in this regard. The most important goals in the energy policies of societies created according to these problems can be listed as follows:

Öz

Ekonomik Yük Dağıtım (EYD) problemi, güç sistemi ve güç sisteminin işletimi planlamasında çok önemli bir alandır. Bu problem çözmek için yük talebini karşılarken elektrik üretim maliyetini en aza indirmeyi amaçlayan farklı teknikler ve algoritmalar önerilmiştir. Bu çalışmada, hat kayıpları, rampa hız limitleri, jeneratörlerin maksimum ve minimum kapasiteleri ile yasak çalışma bölgeleri dikkate alınarak EYD problemini çözmek için Elektrik Balığı Optimizasyonu (EBO) adı verilen yeni bir algoritma kullanılmıştır. Algoritma 6 ve 15 birimden oluşan test sistemlerinde uygulanmıştır ve sonuçları daha önce yapılan araştırmalarla karşılaştırılmıştır. Önerilen algoritmanın, güç sistemi planlama zorluklarını ele almadaki üstünlüğünü ve etkinliğini gösteren minimum maliyete ulaştığı gösterilmiştir. Önerilen algoritmanın EYD problemlerini optimize etmek için değerli bir çözüm sunduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Ekonomik yük dağıtım, Elektrik balığı optimizasyonu, Güç sistemleri

- Obtaining uninterrupted, timely, cheap and clean energy,
- Using the generated energy economically,
- Bringing energy to more people [2].

In line with these goals, power systems have become quite complex, and the operations of these power systems need to be planned and operated in the most appropriate way. Thermal power plants have a large share in energy production. The process of achieving the most efficient and cost-effective operation of thermal power units to meet power demands, through careful planning and enhancing system reliability, is referred to as ELD. In other words, ELD is the generation of the energy demanded by the system at minimum cost considering certain operational and system constraints [3, 4]. Therefore, the ELD problem is an optimization problem that includes various equations and inequalities such as production capacity ranges of units, cost functions and POZ. In general, classical methods were used to figure out these problems in the past. These generally require continuously and linearly increasing cost functions. However, the ELD problem is not continuous. In addition,

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ozgepinarakkas@kku.edu.tr (Ö. P. Akkaş)
Geliş / Received: 13.11.2023 Kabul / Accepted: 04.03.2024 Yayınlanma / Published: 15.04.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1390037

the desired full performance could not be achieved in these methods due to the increase in calculation time as the system grows [5-7]. For these reasons, nowadays, heuristic methods and nature-inspired algorithms are more preferred in solving these problems. A selection of relevant studies on this topic in the existing literature includes the following:

Tosun et al. have employed a simulation algorithm to minimize the hourly energy consumption of the load supplied by three thermal power plants [8]. Basu has utilized the differential evolution algorithm to address the economic environmental dispatch problem across three distinct test systems, each comprising 6, 10, and 40 generation units [9]. Yang et al. have applied the firefly algorithm to solve the ELD problem in four different test systems. This study has encompassed numerous non-linear aspects, including valve point effects, ramp rate constraints and POZ considerations [10]. L. Slimani and T. Bouktir have employed the artificial bee colony algorithm in their research to address the emission-controlled economic dispatch problem. The algorithm has been applied on two systems: the IEEE 30-bus with 6 generator test system and the 59-bus power system in Algeria [11]. Kumar et al. have implemented an enhanced particle swarm optimization algorithm on three distinct power systems, resulting in lower cost values compared to traditional particle swarm optimization methods and their derivatives [12]. Sulaiman et al. have used cuckoo search algorithm to address the combined economic load-emission dispatch problem on a six-unit power system, where transmission line losses have been neglected, and forty-unit power system, where the valve point effect has been included [13]. Abdelaziz et al. have converted the problem into a single objective function by incorporating a modified price penalty factor to simultaneously minimize both fuel cost and emission levels. They then applied the flower pollination algorithm to solve this transformed problem [14]. Pradhan et al. have implemented grey wolf optimization to tackle the ELD problem across a test system featuring 10, 40, 80, and 140 units. The problem has been enriched with nonlinear components, encompassing ramp rate constraints, valve point effects and POZ considerations [15]. Trivedi et al. have implemented interior search algorithm on a microgrid consisting of distribution generator, solar and wind units for minimizing both fuel cost and emission [16]. Jadoun et al. have employed the fireworks algorithm to address the dynamic ELD problem in a hybrid system comprising solar, thermal generators and wind [17]. Srivastava and Das have introduced a novel human intelligence-based metaheuristic optimization technique for tackling the ELD problem [18]. Das et al. have used dragonfly algorithm for the ELD problem in four varied test systems and obtained the lowest cost value as a result of comparison with many heuristic algorithms in all systems [19]. Deb et al. have applied turbulent water flow optimization for both economic and environmental load distribution on a test system with valve effect and conduction losses and demonstrated through numerical examples that the optimization has successful [20].

This article investigates the ELD problem on test systems comprising 6 units with a load demand of 1263 MW and 15

units with a load demand of 2630 MW. The problem has been enriched with operation constraints for the system, encompassing minimum and maximum production limits for generators, ramp rate limits, POZ constraints and power balance considerations. The EFO, which has been introduced to the new literature in 2019, has been used to address the problem. The success and effectiveness of the algorithm have been proven with the study results.

2 Formulation of economic load dispatch problem

The goal of the ELD problem is to reduce fuel costs while considering a range of both equality and inequality constraints. These encompass ramp rate limits, power balance, generation capacity limits and POZ considerations.

2.1 Objective function

The computation of the objective function for the ELD problem is described in Equation 1.

$$\text{Minimize } FC = \sum_{x=1}^g FC_x(P_x) \quad (1)$$

The total fuel cost (\$/h), represented as FC, is determined by the number of generators (g) in the power system, as well as the output power of each generator P_x (MW) and their respective fuel costs FC_x . The primary goal of this function is to minimize FC.

Equation 2 depicts the calculation of fuel cost for each individual generator.

$$FC_x(P_x) = \sum_{x=1}^g a_x P_x^2 + b_x P_x + c_x \quad (2)$$

Where a_x , b_x , c_x represent the cost coefficients of the x-th generator.

2.2 Constraints on generator operations

2.2.1 Minimum and maximum generating limits

In a power system, each generator comes with its own minimum and maximum power output constraints. These restrictions are integral to the ELD problem, ensuring that each generator's power output falls within its designated range, as demonstrated in Equation 3 [21, 22].

$$P_{x,min} \leq P_x \leq P_{x,max} \quad (3)$$

Where $P_{x,min}$ and $P_{x,max}$ represent the minimum and maximum power output of the x-th generator, respectively.

2.2.2 Ramp rate limits

The ramp rate constraint holds significance within the ELD problem, guaranteeing that a generator's power output does not exceed a specified rate of change, thus maintaining system stability and preventing sudden fluctuations in power generation. It is defined as presented in Equation 4 [21].

$$P_x - P_x^0 \leq UPR_x \quad \text{and} \quad P_x^0 - P_x \leq DWR_x \quad (4)$$

Where P_x^0 is output power of x-th generator in the previous time, UPR_x and DWR_x indicate the up-ramp and down-ramp limits of the x-th generator, respectively.

Based on Equations 3 and 4, it is possible to derive limitations for P_x as shown in Equation 5 [21].

$$\max(P_{x,min}, P_x^0 - DWR_x) \leq P_x \leq \min(P_{x,max}, P_x^0 + UPR_x) \quad (5)$$

2.2.3 Prohibited operating zones limits

While solving the ELD problem, one important consideration is the POZ. These zones represent operating conditions in which the generator cannot operate due to technical or safety reasons.

In practical applications, it is essential to ensure that the output power of a generating unit does not fall within POZ. The limitations for P_x in terms of these operating zones are shown in Equation 6 [21].

$$\begin{cases} P_{x,min} \leq P_x \leq P_{x,1}^{LW} \\ P_{x,h-1}^{UP} \leq P_x \leq P_{x,h}^{LW} \quad h = 2, \dots, \text{poz}_x \\ P_{x,\text{poz}_x}^{UP} \leq P_x \leq P_{x,max} \end{cases} \quad (6)$$

Where poz_x indicate the number of POZ for the x-th generator, $P(x,h)LW$ and $P(x,h)UP$ represent the lower and upper limits of the h-th POZ for the x-th generator, respectively.

2.3 Power balance

The constraint of power balance is given in Equation 7 [21, 23].

$$\sum_{x=1}^g P_x = P_{DM} + P_{LS} \quad (7)$$

As can be seen in Equation 7, the total power generated by the generators must meet the total demand (P_{DM}) and the loss (P_{LS}) on the line.

The estimation of PLS, which is dependent on the actual output power of the generators, is often found by Kron's loss equation. This equation is formulated as shown in Equation 8.

$$P_{LS} = \sum_{x=1}^g \sum_{y=1}^g P_x B_{xy} P_y + \sum_{x=1}^g B_{x0} P_x + B_{00} \quad (8)$$

3 Electric fish algorithm

EFO is a new intuitive algorithm founded on the collective intelligence of electric fish and their distinctive characteristics. This algorithm was introduced to the literature by Yılmaz and Şen in 2019 [24].

The electric fish species that inspired the algorithm have a special electrical organ in their bodies containing disc-like electrical cells (electrocytes) and they produce an electric field thanks to the electrical signals produced by these organs. There are two main parameters that characterize the

generated electrical signals and are involved in the algorithm's mechanism. The first factor is frequency, which exhibits an inverse relationship with the time gap between two successive electrical signals. The second factor is the amplitude parameter, which is correlated with the size of the fish [24, 25].

The working mechanism of EFO, like many nature-inspired algorithms, is based on finding the best quality food source. Within an infinite search space, it is assumed that there exists a single food source considered to be the optimal choice. Electric fish are individuals of the optimization algorithm and carry location information within the search space. After the initialization phase, electric fish move through the search space in search of the optimal source. As they move closer to the best source, the frequency of the signal generated by the fish increases and the search space narrows. This state of the electric fish is called active electrolocation mode. Electric fish located at a considerable distance from the best source allow the recognition of distances and the recognition of relationships with other fish. This state of electric fish is called passive electrolocation mode. As mentioned before, the algorithm uses the term frequency as a reference for distance-related operations. Another important feature of the algorithm is that individuals with higher quality sources generate signals with higher amplitude [24, 25].

3.1 Steps of electric fish optimization

3.1.1 General steps

Similar to other nature-inspired algorithms, individuals make up the population in the algorithm. A total of N individuals are initially and randomly placed within the search space [24, 25]:

$$x_{ik} = x_{lowerk} + \varphi(x_{upperk} - x_{lowerk}) \quad (9)$$

where N is the the population size. i depicts the number of the individual ($i=1,2,..N$) and k represents dimension of the search space ($k=1, 2..d$). x_{ik} is the location information of the ith individual. x_{lowerk} and x_{upperk} correspond to minimum and maximum boundaries for dimension, respectively. φ is a random value ranging from 0 to 1 [24, 25].

After each iteration of the calculation of location information, the individuals' amplitude and frequency values are updated. In this update, the individuals that are considered to be closer to the source are kept in active mode, i.e. high frequency -narrow range, while the other individuals are kept in passive electrolocation mode, i.e. low frequency-wide range. If the maximum value of the frequency value f_{max} and the minimum value f_{min} are shown, since the frequency value of each individual is related to the source, the frequency value of each individual is related to its fitness value [24, 25]:

$$fitness_i^j = f_{min} + \left(\frac{fitness_{worst}^j - fitness_i^j}{fitness_{worst}^j - fitness_{best}^j} \right) (f_{max} - f_{min}) \quad (10)$$

where $fitness_i^j$ is the fitness value of the i th individual at iteration j . $fitness_{worst}^j$ and $fitness_{best}^j$ are respectively calculated worst and best fitness values at the relevant iteration j . The f_{min} and f_{max} values are also the maximum and values of the fitness value and these values are fixed between 0 and 1, respectively.

The amplitude of the electric fish provides information about its active range and probability of detection and this value (A_i^j) is calculated in relation to the previous amplitude of the individual as follows [24, 25]:

$$A_i^j = \alpha A_i^{j-1} + (1-\alpha)f_i^j \quad (11)$$

Where α varies between 0-1. The initial amplitude value of the individual is considered equal to the frequency value of that individual.

3.1.2 Active electrolocation steps

In active electrolocation, only one parameter is allowed to change in the range of movement with respect to the presence of neighbours so that fish do not move away from promising spots. This parameter is the individual's activity trajectory and the individual's active distance estimate can be determined using Equation 12 [24, 25].

$$r_i = (X_{upperk} - X_{lowerk})A_i \quad (12)$$

To discover neighbouring individuals in the search range, it is essential to calculate the distance between the i th individual and its neighbouring individual (m th), This value is calculated with the help of the following equation and should be equal to the smaller of the active distance of the individual [24, 25].

$$d_{im} = \|x_i - x_m\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{ik} - x_{mk})^2} \quad (13)$$

If there is at least one neighbouring individual within the active area, Equation 14 is employed, otherwise Equation 15 is applied [24, 25].

$$x_{ik}^{cand} = x_{ik} + \omega(x_{mk} - x_{ik}) \quad (14)$$

$$x_{ik}^{cand} = x_{ik} + \omega r_i \quad (15)$$

Where x_{ik}^{cand} states candidate location of the i th individual and w is a random value ranging between -1 and 1.

3.1.3 Passive electrolocation steps

Passive electrolocating individuals (N_p) fulfil the global search task within the algorithm. Individuals in passive mode select active electrolocating individuals (N_A) based on their probability of detection and change their locations. The probability of the m th individual ($m \in N_A$) performing active electrolocation being detected by the i th individual performing passive electrolocation is calculated as follows:

$$p_m = \frac{A_m/d_{im}}{\sum_{k \in N_A} A_k/d_{ik}} \quad (16)$$

After selecting M individuals with the help of the above equation, the calculation of a reference point (x_{rk}) for them is carried out with Equation 17, and finding new positions is carried out with Equation 18.

$$x_{rk} = \frac{\sum_{m=1}^M A_m x_{mk}}{\sum_{m=1}^M A_m} \quad (17)$$

$$x_{ik}^{new} = x_{ik} + w(x_{rk} - x_{ik}) \quad (18)$$

Although it is not a very common situation, individuals with high frequencies are capable of engaging in passive electrolocation. To prevent it, Equation 19 is used to determine which parameter values of individuals will change.

$$x_{ik}^{cand} = \begin{cases} x_{ik}^{new} & rand_k(0,1) > f_i \\ x_{ik} & else \end{cases} \quad (19)$$

In passive electrolocation, finally, a parameter of an individual is changed using Equation 20. The reason for doing this is to increase the possibility of a characteristic of the individual changing.

$$x_{ik}^{cand} = x_{lowerk} + w(x_{upperk} - x_{lowerk}) \quad (20)$$

For the repositioning of the k th dimension parameter of the i th individual in case it goes beyond the limits of the search space, the following equation is used.

$$x_{ik}^{cand} = \begin{cases} x_{lowerk} & x_{ik}^{cand} < x_{lowerk} \\ x_{ik}^{cand} & x_{upperk} > x_{ik}^{cand} > x_{lowerk} \\ x_{upperk} & x_{ik}^{cand} > x_{upperk} \end{cases} \quad (21)$$

4 Simulation studies and results

In this research, the efficiency of the recommended EFO is evaluated by applying it to both 6-unit test system with 1263 MW load demand and 15-unit test system with 2630 MW load demand in comparison to established optimization techniques commonly used to address the ELD problem. The data for the 6-unit and 15-unit test systems, encompassing details regarding cost coefficients, minimum and maximum generation limits, POZ for generating units, ramp rate constraints and loss coefficients have been sourced from the study [21].

4.1 The results for 6-unit test system

The ELD problem is executed on a 6-unit test system, accounting for factors such as line losses, ramp rate limits, maximum and minimum generating limits and POZ limits. The EFO algorithm has been executed 30 independent runs for the 6-unit system. The proposed approach has been

implemented with a maximum of 400 iterations and a population size of 200. The total cost of this operation amounted to \$15446.64 and the line losses are determined to be 12.6301 MW.

The optimal generation scheduling and the data of minimum/maximum generating values and POZ of each generator, transmission loss, total cost, total power generation for 6-unit system are presented in Table 1.

Table 1. The outcomes for optimal generation scheduling with the data of minimum/maximum generating values and POZ of each generator for 6-unit system

Unit	Generation (MW)	$P_{s,min}$ (MW)	$P_{s,max}$ (MW)	POZ (MW)
1	437.9359	100	500	[210,240], [350,380]
2	176.6343	50	200	[90,110], [140,160]
3	261.6775	80	300	[150,170], [210,240]
4	136.3328	50	150	[80,90], [110,120]
5	167.9562	50	200	[90,110], [140,150]
6	95.0934	50	120	[75,85], [100,105]

Loss (MW): 12.6301, Cost (\$): 15446.64, Total power generation (MW): 1275.6301

As shown in Table 1, the output of the generators remains within the limits of maximum and minimum values, avoiding falling in the POZ. It is observed that the system also meets the ramp rate limits. The data of initial generation (at $t=0$), up and down ramp limits of each generator for the 6-unit system in the study [21] clearly shows that the units are generating power by providing ramp rate limits. Furthermore, it is noteworthy that the system also satisfies the power balance constraint. The total power generation (1275.6301 MW) meets the total demand (1263 MW) and the loss on the line (12.6301 MW).

The convergence curves of decision variables with iterations for the EFO algorithm and 6-unit system is given in Figure 1.

Upon examining the convergence curves of decision variables for EFO algorithm and 6-unit system in Figure 1, it can be seen that a majority of the generators achieve optimal generating power without reaching the maximum iteration number, indicating the fast convergence of the proposed algorithm.

The convergence curve of objective function with iterations for the EFO algorithm and 6-unit system is given in Figure 2.

The fuel cost convergence curve for the EFO algorithm and 6-unit system presented in Figure 2 shows that the EFO algorithm achieves the lowest objective function in fewer iterations, highlighting the efficiency of this proposed method.

The statistical results for 6-unit system including the best, the worst, the median, the mean cost and the standard deviation of the proposed algorithm and various algorithms documented in the literature have been given in Table 2.

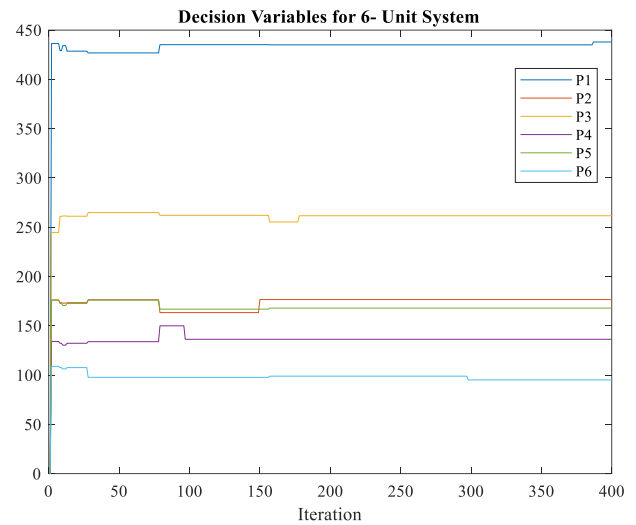


Figure 1. Convergence curves of decision variables for EFO algorithm and 6-unit system

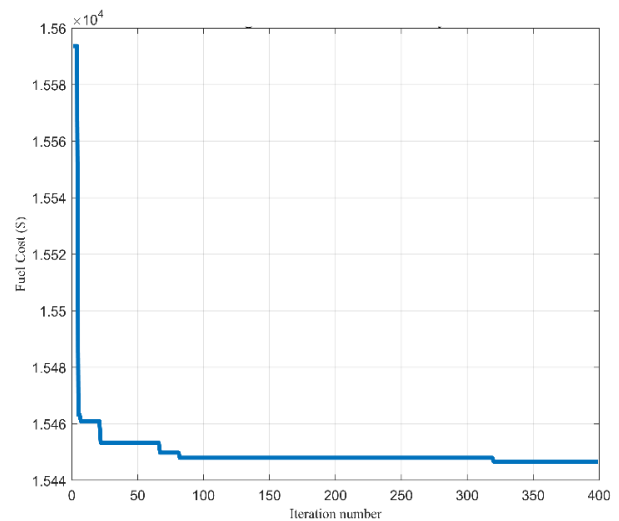


Figure 2. Convergence curve of fuel cost for EFO algorithm and 6-unit system

According to the results presented in Table 2, the EFO algorithm recommended in this study achieves a best cost compared to various methods in the literature with the exception of SOH-PSO and Jaya when solving the ELD problem on the 6-unit test system. Although there is very little difference in the best value with the SOH-PSO and Jaya algorithms, the worst and the mean cost give better results than these algorithms. The mean cost obtained by the EFO algorithm also gives the best result compared to all other algorithms.

4.2 The results for 15-unit test system

The ELD problem is executed on a 15-unit test system, accounting for factors such as line losses, ramp rate limits, maximum and minimum generating limits and POZ limits. The EFO algorithm has been executed 30 independent runs for the 15-unit system. The proposed approach has been implemented with a maximum of 1000 iterations and a population size of 500.

Table 2. Statistical results for 6-unit system

Algorithm	Best	Worst	Median	Mean	Standard Deviation
EFO	15446.64	15450.82	15447.91	15448.08	1.07
GA [26]	15459	15524	NIA	15469	NIA
CBA [27]	15450.24	15518.66	NIA	15454.76	2.965
NPSO-LRS [28]	15450	15454	NIA	15452	NIA
PSO [26]	15450	15492	NIA	15454	NIA
MABC [29]	15449.90	15449.90	NIA	15449.90	6.04E-08
MSSA [30]	15449.90	15453.55	NIA	15449.94	0.3647
ST-IRDPSO [31]	15449.89	NIA	NIA	15450.70	1.416
DEa [32]	15449.77	15449.87	NIA	15449.78	NIA
DEb [33]	15449.58	15449.65	NIA	15449.62	NIA
MCSA [34]	15449.17	15449.39	NIA	15449.24	0.2681
HHS [35]	15449.00	15453.00	NIA	15450.00	NIA
SOH-PSO [36]	15446.02	15609.64	NIA	15497.35	NIA
GA-API [37]	15449.78	15449.85	NIA	15449.81	NIA
DE [32]	15449.766	15449.777	NIA	15449.874	NIA
Jaya [38]	15446.5675	15573.5151	NIA	15489.7034	13.3122
SA [39]	15461.1	15545.5	NIA	15488.98	28.3678
TS [39]	15454.89	15498.05	NIA	15472.56	13.7195
SSGA [40]	15447	15470	NIA	15450	7.458
FA [41]	15450.509	15458.4427	NIA	15452.531	2.048
CMFA [41]	15449.8994	15449.8994	NIA	15449.8994	8.96E-06
MTS [39]	15450.06	15453.64	NIA	15451.17	NIA

The total cost of this operation amounted to \$32692.30 and the line losses are determined to be 29.0475 MW.

The optimal generation scheduling and the data of minimum/maximum generating values and POZ of each generator, transmission loss, total cost, total power generation for 15-unit system are presented in Table 3.

As shown in Table 3, the output of the generators remains within the limits of maximum and minimum values, avoiding falling in the POZ. It is observed that the system also meets the ramp rate limits. The data of initial generation (at t=0), up and down ramp limits of each generator for the 15-unit system in the study [21] clearly shows that the units are generating power by providing ramp rate limits. Furthermore, it is noteworthy that the system also satisfies the power balance constraint. The total power generation (2659.0475 MW) meets the total demand (2630 MW) and the loss on the line (29.0475 MW).

The statistical results for 15-unit system including the best, the worst, the median, the mean cost and the standard deviation of the proposed algorithm and various algorithms documented in the literature have been given in Table 4.

According to the results presented in Table 4, the EFO algorithm recommended in this study achieves a best cost compared to various methods in the literature when solving the ELD problem on the 15-unit test system.

Table 3. The outcomes for optimal generation scheduling with the data of minimum/maximum generating values and POZ of each generator for 15-unit system

Unit	Generation (MW)	$P_{x,min}$ (MW)	$P_{x,max}$ (MW)	POZ (MW)
1	455	10.1	671	
2	379.9613	10.2	574	[185 255], [305 335], [420 450]
3	130	8.8	374	
4	130	8.8	374	
5	169.9064	10.4	461	[180 200], [305 335], [390 420]
6	459.9839	10.1	630	[230 255], [365 395], [430 455]
7	429.9594	9.8	548	
8	75.4553	11.2	227	
9	58.6954	11.2	173	
10	155.1383	10.7	175	
11	79.9726	10.2	186	
12	79.9749	9.9	230	[30 40], [55 65]
13	25	13.1	225	
14	15	12.1	309	
15	15	12.4	323	

Loss (MW): 29.0475, Cost (\$): 32692.30, Total power generation (MW): 2659.0475 MW

Table 4. Statistical results for 15-unit system

Algorithm	Best	Worst	Median	Mean	Standard Deviation
EFO	32692.30	33041.86	32982.51	32967.23	60.32
EO [42]	32701.18	32701.51	NIA	32701.31	NIA
ABC [43]	32787.836	NIA	NIA	32791.5366	NIA
TLBO [44]	32697.22	32697.22	NIA	32697.22	0
MPSO-GA [45]	32702	32755.19	NIA	32701.31	NIA
EO-SCA [46]	32700.51	32701.05	NIA	32702.74	NIA
PSOSIF [47]	32706.88	32709.92	NIA	32707.79	3.04
GA-API [37]	32732.95	32756.01	NIA	32735.06	NIA
FA [48]	32704.45	33175.00	NIA	32856.10	NIA
EPSO [49]	32704.83	32762.01	NIA	32725.37	NIA
IAEDP [50]	32698.20	32823.78	NIA	32750.22	29.2989
EMA [51]	32704.45	32704.45	NIA	32704.45	NIA
GABC [52]	32706.66	32706.81	NIA	32706.69	0.035838
CCSO [53]	32706.64	32706.64	NIA	32706.64	0.0007
CSO [53]	32709.36	32722.55	NIA	32712.49	4.56
BF-NM [54]	32784.5024	NIA	NIA	32976.81	85.77
DSPSO-TS [55]	32715.06	32730.39	NIA	32724.63	8.4
TS [55]	32917.87	33245.54	NIA	33066.76	66.82
Jaya [38]	32712.6458	32822.9993	NIA	32743.4613	47.0256

The convergence curves of decision variables with iterations for the EFO algorithm and 15-unit system is given in Figure 3.

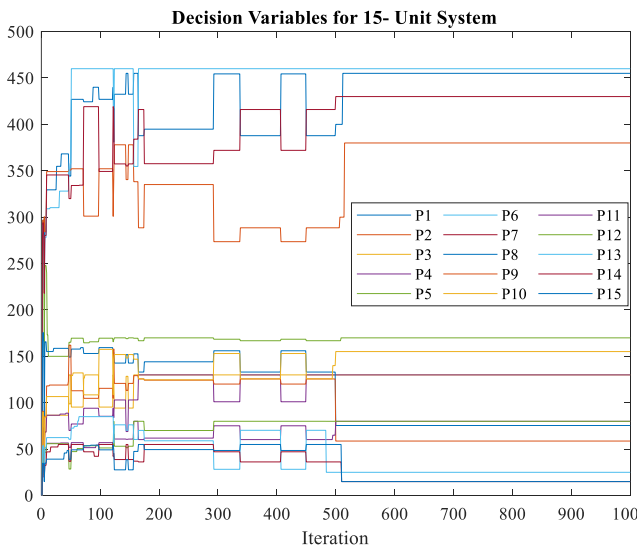


Figure 3. Convergence curves of decision variables for EFO algorithm and 15-unit system

Upon examining the convergence curves of decision variables for EFO algorithm and 15-unit system in Figure 3, it can be seen that a majority of the generators achieve optimal generating power without reaching the maximum iteration number, indicating the fast convergence of the proposed algorithm.

The convergence curve of objective function with iterations for the EFO algorithm and 15-unit system is given in Figure 4.

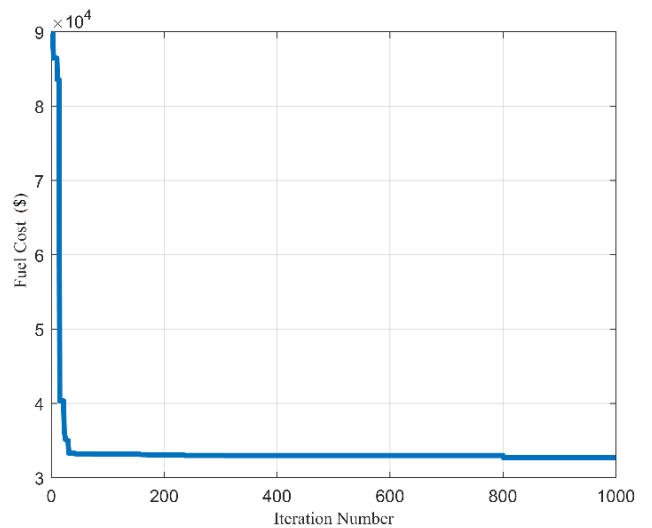


Figure 4. Convergence curve of fuel cost for EFO algorithm and 15-unit system

The fuel cost convergence curve for the EFO algorithm and 15-unit system presented in Figure 4 shows that the EFO algorithm achieves the lowest objective function in fewer iterations, highlighting the efficiency of this proposed method.

5 Conclusion

The ELD problem is crucial in power system planning and operational scheduling. Its primary aim is to minimize power generation costs while meeting load demands. Numerous methods and algorithms have been developed over time to address this challenge. In this article, a new approach called the EFO is recommended for the ELD problem. The algorithm considers various factors such as line losses, POZ limits, ramp rate constraints, generator capacity limits (both maximum and minimum). To verify its efficacy, the EFO algorithm is evaluated on various test systems consisting of both 6-unit and 15-unit configurations.

In conclusion, the EFO algorithm used in this study offers a superior solution to the ELD problem for 6-unit and 15-unit test systems. It generates a generation scheduling with lower cost compared to other techniques and algorithms. The EFO algorithm proves to be efficient and effective in solving the ELD problem, providing a lower cost generation scheduling. The results indicate that the proposed algorithm consistently yields superior solutions compared to established optimization techniques documented in the literature. The convergence curves clearly demonstrate that the EFO exhibits favorable convergence characteristics, converging rapidly and efficiently.

In the future work, the proposed EFO algorithm can be implemented on large test systems such as IEEE 118-bus test system and the proposed approach can be used for solving other optimization problems in the area of power systems.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 20%

References

- [1] B. Yanıktepe, T. Kısakürek Parlak and O. Kara, Relationship between energy consumption and economic growth: Turkey. *Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology*, 4 (3),452-465,2021. <https://doi.org/10.47495/okufbed.972716>.
- [2] M. Karahan, A Modeling of Turkey for energy consumption and economic growth. Master Thesis, Uludağ University, Social Science Institution, Turkey, 2014.
- [3] D. Singh and J. S. Dhillon, Ameliorated grey wolf optimization for economic load dispatch problem. *Energy*, 169, 398-419, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.034>.
- [4] M. Saka, Economic load and emission dispatch analysis at power systems, Master Thesis, Gazi University, Natural and Applied Sciences, Turkey, 2017.
- [5] S. Hemamalini and S. P. Simon, Artificial bee colony algorithm for economic load dispatch problem with non-smooth cost Functions. *Electric Power and Components and Systems*, 38 (7), 786-803, 2010. <https://doi.org/10.1080/15325000903489710>.
- [6] M.S. Turgut and G. Kalaycı Demir, Solution of the economic load dispatch problems with artificial cooperative search algorithm. *Dokuz Eylul University-Faculty of Engineering Journal of Science and Engineering*, 19 (55), 16-27, 2017. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2017195502>.
- [7] I. Eke, S. S.Tezcan and Ç. Çelik, Solving economic load dispatch problem with valve-point effects using filled function. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 32 (2), 429-438, 2017. <https://doi.org.tr/10.17341/gazimmfd.322167>.
- [8] S. Tosun, A. Öztürk, P. Erdoğan, Y. Biçen, U. Hasırcı, Determination of optimal fuel cost in electric power system using simulated annealing (BT) Algorithm. 5th International Advanced Technologies Symposium, Karabuk, Turkey, 2009.
- [9] M. Basu, Economic environmental dispatch using multi-objective differential evolution. *Applied Soft Computing*, 11, (2) 2845-2853, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2010.11.014>.
- [10] X. Yang, S. S.S. Hossesini, Gandomi, A. H., Firefly algorithm for solving nonconvex economic dispatch problems with valve loading effect. *Applied Soft Computing* 12,1180-1186, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.09.017>.
- [11] L. Slimani and T. Bouktir, Economic power dispatch of power systems with pollution control using artificial bee colony algorithm. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 21 (6), 1515-1527, 2013. <https://doi.org/10.3906/elk-1106-10>.
- [12] N. Kumar, U. Nangia and K.B. Sahay, Economic load dispatch using improved particle swarm optimization. 6th IEEE Power India International Conference, Delhi, India, 2014.
- [13] M. H. Sulaiman, Z. Mustaffa, M.R. Mohamed, N.R.H. Abdullah, An application of cuckoo search algorithm for solving combined economic and emission dispatch problem. *International Conference on Informatics, Electronics & Vision*, Fukuoka, Japan, 2015.
- [14] A. Y. Abdelaziz, E.S. Ali and S. M. Abd Elazim, Implementation of flower pollination algorithm for solving economic load dispatch and combined economic emission dispatch problems in power systems. *Energy*, 101, 506-518, 2016.
- [15] M. Pradhan, P. K. Roy and T. Pal, Grey wolf optimization applied to economic load dispatch problems. *International Journal of Electrical Power& Energy Systems*,83, 325-334, 2016.
- [16] I. N. Trivedi, P. Jangir, M. Bhoje and N. Jangir, An economic load dispatch and multiple environmental dispatch problem solution with micr grids using interior search algorithm. *Neural Computing and Applications*, 30, 2173-2189, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2795-5>.
- [17] V. K., Jadoun, V. C. Pandey, N. Gupta, K. R. Niazi and A. Swarnkar, Integration of renewable energy sources in dynamic economic load dispatch problem using an improved fireworks algorithm, 12 (9), 1004-1011, 2018. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2017.0744>.
- [18] A. Srivastava and D. K. Das, A new aggrandized class topper optimization algorithm to solve economic load

- dispatch problem in a power system, IEEE Transactions on Cybernetics, 52 (6),4187-4197, 2020. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2020.3024607>.
- [19] D. Das, A., Bhattacharya and R. Narayan Ray, Dragonfly algorithm for solving probabilistic economic load dispatch problems. Neural Computing and Applications, 32, 3029-3045, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04268-9>.
- [20] S. Deb, E. H. Houssein, M. Said and D. S. Abdelminaam, Performance of turbulent flow of water optimization on economic load dispatch problem. IEEE Access, 9, 77882-77893, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3083531>
- [21] M. H. Hassan, S. Kamel, A. Eid, L. Nasrat, F. Jurado and M. F. Elnaggar, A developed eagle-strategy supply-demand optimizer for solving economic load dispatch problems, Ain Shams Engineering Journal, 14,5,102083,2023.<https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.102083>.
- [22] M.H. Hassan, E.H. Houssein, M.A. Mahdy and S. Kamel, An improved Manta ray foraging optimizer for cost-effective emission dispatch problems. Eng Appl Artif Intell Apr., 100, 104155, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2021.104155>.
- [23] M.H. Hassan, D. Yousri, S. Kamel and C. Rahmann, A modified Marine predators algorithm for solving single- and multi-objective combined economic emission dispatch problems. Comput Ind Eng 164, 107906,2022.<https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107906>.
- [24] S. Yilmaz and S. Sen, Electric fish optimization: a new heuristic algorithm inspired by electrolocation. Neural Comput & Applic 32, 11543–11578, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04641-8>.
- [25] R. A. Ibrahim, L. Abualigah, A.A. Ewees, M. A.A. Alganess, D. Yousri, S. Alshathri, M. A. Elaziz, An Electric Fish-Based Arithmetic Optimization Algorithm for Feature Selection, Entropy, 23,9,1189, 2021. <https://doi.org/10.3390/e23091189>
- [26] Z-L. Gaing, Particle swarm optimization to solving the economic dispatch considering the generator constraints. IEEE Trans Power Syst Aug, 18(3), 1187-1195,2003.<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2003.814889>.
- [27] B.R. Adarsh, T. Raghunathan, T. Jayabarathi and X-S, Yang, Economic dispatch using chaotic bat algorithm. Energy, 96, 666-675, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.096>.
- [28] A.I.Selvakumar and K. A.Thanushkodi, New particle swarm optimization solution to nonconvex economic dispatch problems. IEEE Trans Power Syst, 22,1, 42 51,2007. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.889132>
- [29] D.C. Secui, A new modified artificial bee colony algorithm for the economic dispatch problem. Energy Convers Manag Jan., 89,43-62, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.09.034>.
- [30] W.T. Elsayed, Y.G. Hegazy, F.M. Bendary, MS. El-bages, Modified social spider algorithm for solving the economic dispatch problem. Eng Sci Technol an Int J, 19 (4), 1672-1681, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jes Tch.2016.09.002>
- [31] W.T. Elsayed, Y.G. Hegazy, MS. El-bages,FM. Bendary, Improved random drift particle swarm optimization with self-adaptive mechanism for solving the power economic dispatch problem. IEEE Trans Ind Informatics, 13 (3), 1017-1026, 2017. <https://doi.org/10.1109/TII.2017.2695122>.
- [32] N. Noman and H. Iba, Differential evolution for economic load dispatch problems. Electr Power Syst Res Aug, 78 (8), 1322-1331, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2007.11.007>
- [33] W.T. Elsayed, E.F. El-Saadany, A fully decentralized approach for solving the economic dispatch problem. IEEE Trans Power Syst Jul, 30,4,2179-2189, 2015. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2360369>
- [34] F.Mohammadi and H.A. Abdi, A modified crow search algorithm (MCSA) for solving economic load dispatch problem. Appl Soft Comput, 71, 51-65,2018. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.06.040>
- [35] M. Fesanghary and M. M. Ardehali, A novel meta-heuristic optimization methodology for solving various types of economic dispatch problem. Energy, 34,6, 757–766, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.02.007>.
- [36] K. T. Chaturvedi, M. Pandit, and L. Srivastava, Self-Organizing hierarchical particle swarm optimization for nonconvex economic dispatch. IEEE Transactions on Power Systems, 23 (3), 1079-1087, 2008. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2008.926455>.
- [37] I. Ciornei and E. A. Kyriakides, GA-API solution for the economic dispatch of generation in power system operation. IEEE Transactions on Power Systems, 27,1 233-242, 2012. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2011.2168833>
- [38] J. Yu, C-H. Kim, A. Wadood, T. Khurshaid, S. B. Rhee, Jaya Algorithm With SelfAdaptive Multi-Population and Lévy Flights for Solving Economic Load Dispatch Problems. IEEE Access, 7, 21372-21384, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2899043>.
- [39] S. Pothiya, I. Ngamroo, W. Kongprawechnon, Application of multiple tabu search algorithm to solve dynamic economic dispatch considering generator constraints. Energy Convers Manag Apr, 49 (4), 506-516, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.08.012>.
- [40] C.C Kuo, A novel string structure for economic dispatch problems with practical constraints. Energy Conversin and Management, 49 (12), 3571-3577. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.07.007>.
- [41] Y. Yang, B. Wei, H. Liu, Y. Zhang, J. Zhao E. Manla, Chaos firefly algorithm with self-adaptation mutation mechanism for solving large-scale economic dispatch with valve-point effects and multiple fuel options. IEEE Access 6, 45907–45922,2018. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2865960>.

- [42] S. Agnihotri, Atre A. and Verma HK. Equilibrium optimizer for solving economic dispatch problem, in 2020 IEEE 9th Power India International Conference (PIICON), Feb. 2020, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/PIICON49524.2020.9113048>.
- [43] S.K. Nayak, K.R. Krishnanand, B.K. Panigrahi and P.K. Rout, Application of artificial bee colony to economic load dispatch problem with ramp rate limits and prohibited operating zones. World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC) 1237–42. 2009 <https://doi.org/10.1109/NABIC.2009.5393751>
- [44] S.H. Nee Dey, Teaching learning based optimization for different economic dispatch problems. Scientia Iranica, 21,3, 870-884, 2014.
- [45] H. Barati and M. Sadeghi, An efficient hybrid MPSO-GA algorithm for solving nonsmooth/non-convex economic dispatch problem with practical constraints. Ain Shams Eng J Dec. 9 (4), 1279-1287, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2016.08.008>.
- [46] A. Atre, S. Agnihotri and H.K. Verma, Hybrid EO-SCA based economic load dispatch. In: 2020 IEEE First International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control. <https://doi.org/10.1109/STPEC49749.2020.9297737>.
- [47] N. Ghorbani, S. Vakili, E. Babaei and A. Sakhavati, Particle swarm optimization with smart inertia factor for solving non-convex economic load dispatch problems. Int Trans Electr Energy Syst Aug. 24,8, 1120-1133, 2014. <https://doi.org/10.1002/etep.1766>
- [48] X.S. Yang, S.S. Sadat Hosseini and A.H. Gandomi, Firefly Algorithm for solving non-convex economic dispatch problems with valve loading effect. Appl. Soft Comput., 12 (3), 1180-1186, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.09.017>
- [49] M.N Abdullah, A.H. Abu Bakar, N.A, Rahim, and H. Moklis, Economic load dispatch with nonsmooth cost functions using evolutionary particle swarm optimization. IEEJ Trans. Electr Electron Eng, 8, S1,30-37, 2013. <https://doi.org/10.1002/tee.21915>.
- [50] V.S. Aragón, S.C. Esquivel and C.A. Coello Coello, An immune algorithm with power redistribution for solving economic dispatch problems. Inf. Sci. (Ny), 295609–632 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.10.026>
- [51] N. Ghorbani and E. Babaei, Exchange market algorithm for economic load dispatch. Int J Electr Power Energy Systems, 75, 19-27, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.08.013>
- [52] H.T. Jadhav and R. Roy, Gbest guided artificial bee colony algorithm for environmental/economic dispatch considering wind power. Expert System with Applications, 40 (16) 6385–6399. ,2013. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.05.048>
- [53] J. Yu, C-H. Kim and S-B. Rhee, Clustering cuckoo search optimization for economic load dispatch problem. Neural Computing and Applications, 32 (22), 16951–69, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05036-w>.
- [54] B.K. Panigrahi and V. Ravikumar Pandi, Bacterial foraging optimisation: NelderMead hybrid algorithm for economic load dispatch. IET Generation, Transmission and Distribution, 2 (4), 556-565, 2008. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd:20070422>.
- [55] S. Khamsawang and S. Jiriwibhakorn DSPSO–TSA for economic dispatch problem with nonsmooth and noncontinuous cost functions. Energy Conversion and Management, 51 (2), 365-375, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.09.034>





Investigation on the mechanical properties of resin pin-reinforced marine sandwich composite structures under quasi-static indentation load

Yarı-statik batma yükü altında reçine pimi ile güçlendirilmiş denizel sandviç kompozit yapıların mekanik özelliklerinin incelenmesi

Fatih Balıkoğlu¹ , Tayfur Kerem Demircioğlu^{2,*} , Mehmet Özer³ , Ali Işıktaş⁴ 

^{1,2} Balıkesir University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, 10145, Balıkesir, Türkiye

³ Balıkesir University, Bigadiç Vocational School, Transportation Services Department, 10440, Balıkesir, Türkiye

⁴ Balıkesir University, Edremit Vocational School, Electronics and Automation Department, 10300, Balıkesir, Türkiye

Abstract

This study aims to experimentally examine the indentation behaviour of marine sandwich composites with pin-reinforced polyvinyl chloride foam core and E-glass face sheets. The effects of indenter diameter, resin pin diameter, and arrangement on force-displacement, maximum contact force, and absorbed energy values of sandwich panels were evaluated by the indentation tests. Throughout the experiments, the contact forces increased as the pin diameter increased from Ø2 mm to Ø4 mm. The contact forces decreased as the distance between pin diameters increased from 12 mm to 16 mm and 18 mm. Additionally, the values of absorbed energy increased as the diameters of the resin pin and indenter increased. Placing pins at a distance of 12 mm allows the material to absorb more energy for Ø12.7 mm and Ø20 mm indenter tips. The 8 mm diameter and 12 mm spacing holes provide significant initial resistance to penetration, despite the increase in weight in critical areas, against object contact from Ø12.7 to Ø20 mm. A visual inspection took place on the post-indentation cross-sections of the sandwich specimens to detect any damage modes. Damage modes varied depending on the size of the indenter and the hole pattern in the foam core.

Keywords: Sandwich composite, Pin reinforcement, PVC foam, Indentation

1 Introduction

Polymer sandwich composites are extensively used in the maritime industry because of their excellent advantages, including high specific bending strength and stiffness, excellent corrosion resistance to the seawater environment, design and production flexibility, and low repair and replacement costs [1, 2]. They are often employed in the construction of pleasure and fishing boats and military patrol boats and are becoming more popular in the offshore oil and gas industry [3, 4]. In small boats with sandwich construction, foam materials, particularly polyvinyl chloride foam (PVC), are used for their lightweight combination with glass and carbon fibre-reinforced polymer face sheets [5].

Öz

Bu çalışma, pimle güçlendirilmiş polivinil klorür köpük çekirdekli ve E-cam tabakalı denizel sandviç kompozitlerinin batma davranışını deneysel olarak incelemeyi amaçlamaktadır. Batma ucu çapı, reçine pim çapı ve diziliminin sandviç panellerin kuvvet-yer değiştirme, maksimum temas kuvveti ve emilen enerji değerleri üzerindeki etkileri batma testleri ile değerlendirilmiştir. Deneysel boyunca pim çapı Ø2 mm'den Ø4 mm'ye çıkması ile temas kuvvetleri de artmıştır. Pim çapları arasındaki mesafe 12 mm'den 16 mm'ye ve 18 mm'ye artışı ile temas kuvvetleri azalmıştır. Ek olarak, reçine pimi ve batma ucu çapı arttıkça emilen enerji değerleri de artmıştır. Pimlerin 12 mm mesafeye yerleştirilmesi, malzemenin Ø12,7 mm ve Ø20 mm batma uçları için daha fazla enerji emmesine olanak tanır. 8 mm çapında ve 12 mm aralıklı delikler, kritik alanlardaki ağırlık artışına rağmen Ø12,7'den Ø20 mm'ye kadar nesne temasına karşı nüfuz etmeye karşı önemli bir başlangıç direnci sağlar. Herhangi bir hasar modunu tespit etmek için sandviç numunelerinin batma testleri sonrası kesitleri üzerinde görsel bir inceleme gerçekleştirildi. Hasar modları girintinin boyutuna ve köpük çekirdeğindeki delik düzenine bağlı olarak değişmiştir.

Anahtar kelimeler: Sandviç kompozit, Pim takviyesi, PVC köpük, Batma

However, composites used in marine crafts have low damage tolerances for out-of-plane contact and impact loads [6]. It is well-known that composite boats experience various risks that can lead to collisions, including crashing with other boats and docks, running aground, being struck by floating debris, and tools failing during production [7]. All these crashes involve out-of-plane impact loads and may result in severe damage, such as boats taking on water and sinking at sea.

In experimental works, costly impact equipment for recording dynamic responses data filtering owing to signal fluctuations, and the difficulty of evaluating results have all contributed to the preference for quasi-static indentation testing. Its use is increasing, particularly for low-velocity impact tests with minimal strain rate and wave propagation

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: tkerem@balikesir.edu.tr (T. K. Demircioğlu)

Geliş / Received: 05.02.2024 Kabul / Accepted: 08.03.2024 Yayımlanma / Published: 15.04.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1432063

effects [8]. Furthermore, the use of quasi-static tests as a simpler and more cost-effective method has resulted in a decrease in testing costs.

The behaviour of foam core sandwich composites against indentation loads has been extensively investigated in the literature. The relation between foam property and indentation resistance has been presented in several research. Zniker, Houcine, et al. [9] compared the damage response and energy absorption capacity of PVC foam sandwich composite panels and glass fibre-reinforced polymer (GFRP) laminates under repeated low-velocity impact loads and quasi-static indentation. Due to its low indentation resistance, the PVC foam does not affect the quasi-static response of the sandwich composites. Rizov, V., and Mladensky, A. [10] investigated the effect of foam core density on the indentation response of sandwich panels with glass fibre-reinforced face sheets. The results of indentation tests showed that as the density of the foam core increased, the maximum load increased. In other words, sandwich panels with denser foam cores had higher indentation resistance. This result was explained as an increase in the foam stiffness due to the increase in the elastic modulus with density. Kazemi, M. [11] examined the influence of variations in polyurethane foam core density on the quasi-static penetration process of aluminium-faced sandwich panels with constant mass and total core thickness. Increased contact force and, thus, better penetration resistance were observed by employing graded sandwich panels with decreasing foam core density. Świąch, Ł. et al. [12] performed perimeter shear tests on sandwich panels with a polymethacrylimide (PMI) foam core. Authors found that increasing foam thickness increased the plateau area in force-displacement behaviour but did not increase contact forces.

The effect of indenter tip shape as a test parameter has also been widely investigated in indentation studies. Azzam, A., and Wei, L. [13] studied the effect of indenter tips on quasi-static indentation damage in foam sandwich composites. It was found that brittle behaviour and a larger peak load occurred in the quasi-static test with a hemispherical tip, but ductile behaviour and the lowest peak load took place in the cylindrical tip test. This event was explained by differences in bending forces applied to different areas of the specimens. Moreover, different types of damage were induced by hemispherical and cylindrical tips. On the compressive side, hemispherical tips cause foam crack, face wrinkling, fibre breakage, and upper face crushing, while cylindrical tips cause initial delamination, micro buckling on the face sheet, core indentation, face wrinkling, and linear crack formation. Muscat-Fenech, C.D.M et al. [14] investigated the effect of penetrating tip geometries with hemispherical, conical, square-based pyramid and cylindrical flat-faced geometry in quasi-static indentation tests of marine sandwich composites. The damage caused by various indenters was evaluated in terms of force, absorbed energy, and indentation displacement. The force-displacement plots exhibited similar trends for conical and pyramidal tips, while demonstrating different characteristics for hemispherical and cylindrical tips. The

highest penetration forces were recorded with a flat-faced cylindrical tip compared to others. Garrido, M., et al. [15] performed quasi-static indentation and low-speed impact tests on sandwich composites containing polyurethane and polyethylene terephthalate foams and balsa core. Comparing the results of the quasi-static indentation and low-speed impact tests, the quasi-static test accurately predicts the initial damage load and initial stiffness at low impact velocity. The authors reported that the perforation energies of the panels were higher for impact tests than for indentation tests; these differences varied depending on the indenter tip shape. Test results showed that the increased indenter diameter required more initial peak force and perforation energy.

Research has been conducted on the utilization of resin cuts to reinforce sandwich panels with foam cores against indentation loads [16-18]. Abdi, B., et al. [16] experimentally examined the behaviour of pin reinforced sandwich panels under quasi-static indentation and flat compression tests. Although the weight of the panels increased, it was found that by strengthening the panels containing foam core with pins, the improvement in indentation and compression strengths was higher. The penetration resistance and compressive strength increased as the pin diameter increased. Furthermore, the use of polymer pin reinforcement foam core was found to be a better choice than increasing the thickness of face sheets of the sandwich panel. Eyvazian, A et al. [17] studied the indentation and bending behaviour of resin pin-reinforced composite sandwich panels made of polyvinyl chloride core and glass/epoxy face sheets. The addition of resin pins to polyvinyl chloride foam core resulted in a significant increase in the maximum indentation load as compared to foam core sandwich structures without reinforcement. Furthermore, the use of resin pins resulted in changes to the damage modes observed in the specimens. This led to an improvement in the energy absorption capacity of sandwich structures under indentation loads. Another study produced similar results, indicating that the insertion of resin reinforcements into the foam resulted in higher contact forces and higher energy absorption capacity [18].

In the published work, it was observed that the usage of pin-reinforced foam improved the indentation resistance of sandwich structures. In this paper, the indentation tests of sandwich panels produced with different pin diameter and diameter centre-distances were conducted to compare force-displacement graphs, contact forces, absorbed energy values, and damage modes. Furthermore, as parameters, the dimension of the hemispherical geometry indenter tip utilized in the experiments were evaluated.

2 Material and method

The face sheets were made of E-glass chopped strand mat (CSM) and E-glass bi-directional stitched non-crimp fabrics (Metyx Composites Corporation, Istanbul/Turkey). Lamination plans for the upper and lower face sheets are given in detail in Table 1. Table 2 shows the elastic and mechanical characteristics of upper and lower face sheets in the warp direction according to the standards. Sandwich

panels were produced with an infusion type vinyl ester resin (Poliya, Polives702). In the core material, polyvinyl chloride foam (Airex C.70.75) [19] with a thickness of 25 mm and a density of 80 kg/m³ was selected. To produce holes in the foam material, a CNC three-axis vertical milling machine was employed. For distances of 12 mm, 16 mm, and 18 mm between holes, 1 square meter of PVC foam sheet requires an approximate total of 80, 60, and 55 holes, respectively. These holes were filled with resin in the infusion method and took the shape of solid pins after curing. The weights of the produced sandwich panels were also compared. The square meter weights of sandwich panels with Ø4-12, Ø4-16, and Ø4-18 resin pin arrangements were measured as 15.3 kg, 14.77 kg, and 12.57 kg, respectively. The square meter weights of sandwich panels with Ø8-12, Ø8-16, and Ø8-18 resin pin arrangements were 20.7 kg, 17.7 kg, and 14.7 kg, respectively. Details of the hard resin pattern and pin-reinforced sandwich panel are presented in Figure 1a, b.

The process of vacuum-assisted resin infusion moulding (VARIM) is employed for producing sandwich panels (Figure 2). The VARIM method is given in detail in Figure 2. There was no need for peel ply cloth or flow net since holes were drilled in PVC foams. The resin flows through the mould under vacuum, wetting the E-glass fibres and filling holes in the PVC before reaching the vacuum line and resin trap. After production, the pin reinforced sandwich panels were allowed to cure for 24 hours. The panels were cut on a band saw in dimensions of 100 mm × 100 mm for indentation tests.

Table 1. Lamination plans of face sheets

Facesheet	Thickness (mm)	Stacking of fabrics	Areal weight (g/m ²)
Upper	2.4	Biaxial E-glass	850
		Biaxial E-glass	850
		Biaxial E-glass	850
Lower	4	CSM	450
		CSM	450
		Biaxial E-glass	850
		Biaxial E-glass	850
		Biaxial E-glass	850
		Biaxial E-glass	850

Table 2. Elastic properties and strength of upper and lower E-glass/vinyl ester face sheet

Skin	Elastic modulus (GPa)	Poisson ratio	Shear modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Compression strength (MPa)	Shear strength (MPa)
Upper skin	20.70	0.14	4.10	355.90	226.70	51.6
Lower skin	22.50	0.17	4.40	394.10	244.20	53.5

Indentation tests were performed using the apparatus on the Zwick Roell Z250 test device. Sandwich test samples are fixed between two square steel plates with a circular hole in the centre (Figure 3). The experiments were carried out at a loading rate of 1.25 mm/minute using hemispherical indenters with diameters of 12.7 mm and 20 mm. The specimens were completely perforated in the tests. The thinner face sheets are positioned on the top section during the tests corresponding to the interior of the hull. At least three specimens from each series were tested.

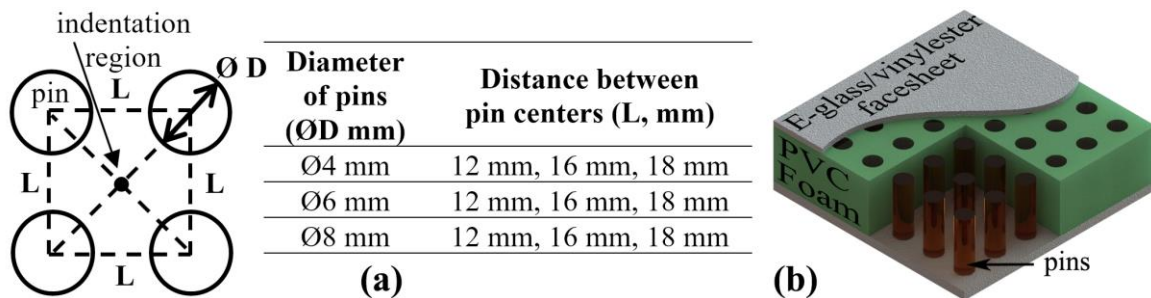


Figure 1. (a) Solid resin pin pattern and indentation zone, (b) schematic of pin-reinforced sandwich panel

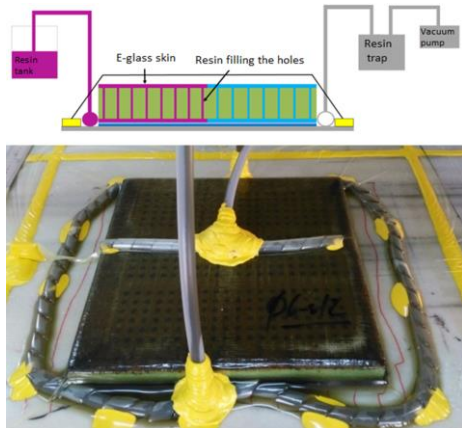


Figure 2. Production of pin reinforced sandwich panels

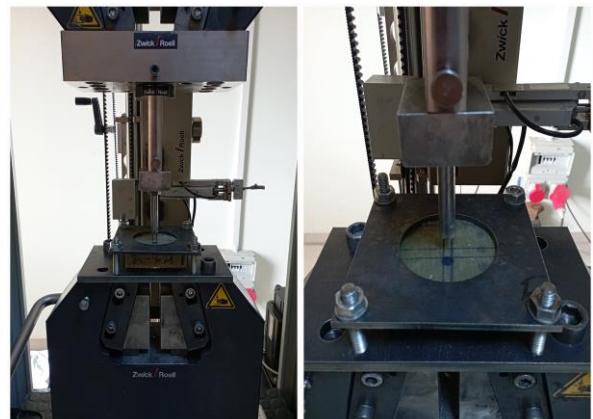


Figure 3. Experimental setup for indentation tests

3 Results and discussion

3.1 Force-displacement behaviour

Force-displacement curves are presented in Figure 4. The specimens showed curves consisting of two peaks and plateau region during testing. The initial peak is generated when the indenter penetrates the upper skin, followed by the second peak as it reaches the lower skin. The formation of the plateau region between the two peaks takes place as the indenter moves through the foam core material [18]. The contact load increased almost linearly in all specimen curves until it reached a maximum value, which corresponded to upper face sheet perforation and foam core crushing. In addition, the initial stiffness was higher in specimens with 12 mm distance between pin centres. As the foam core was crushed and densified in the plateau region, the contact force diminished in the curves of the specimens. As can be seen from the graphs, indenter diameter, pin diameter and pin arrangement influenced the difference between the first and second peaks. For specimens with a high first peak, it means that the initial indentation resistance is strong. During the experiments conducted using a 20 mm diameter indenter as seen Figure 4 b and d, it was found that the contact forces obtained in the plateau regions between the two peaks were higher. The increased contact forces observed in this region, particularly in specimens $\text{Ø}4\text{-}12$ and $\text{Ø}8\text{-}12$, can be attributed to the contact with the resin pins. The reason for this is that the diagonal length reduces as the distance between the square pattern hole centres opened into the foam material decreases.

3.2 Maximum contact forces

The forces resulting from contact with the upper and lower face sheets during indentation tests are shown in Figure 5. As expected, the increase in pin diameter resulted in a related increase in contact forces. The first and second peaks exhibited an increase in maximal contact forces as the diameter of the indenter was larger. Specimens $\text{Ø}4\text{-}12$ and $\text{Ø}8\text{-}12$ showed the highest peaks as seen in Figure 5. This shows that increasing the indentation resistance requires frequent pin centring. In the tests performed with a $\text{Ø}12.7$ mm indenter on specimens with 4 mm pins, the second peaks were higher in all of them. Tests with a $\text{Ø}12.7$ mm indenter on specimens with 4 mm pins resulted in higher second peaks. With the $\text{Ø}20$ mm indenter, the first peaks were higher at $\text{Ø}4\text{-}12$ mm and $\text{Ø}4\text{-}16$ mm specimens. The pins with a diameter of 4 mm provided less resistance to the indenter tip with a diameter of $\text{Ø}12.7$ mm than the bottom face sheet (Figure 5a). For the 20 mm indenter, pins at $\text{Ø}4\text{-}12$ mm and $\text{Ø}4\text{-}16$ mm increased the initial indentation resistance more than the lower face sheet (Figure 5b). Specimen $\text{Ø}4\text{-}18$ exhibited a decrease in initial resistance (Figure 5b). The initial resistance was higher in the $\text{Ø}8\text{-}12$ sample against the 12.7 mm indenter (Figure 5c). For pins with a diameter of 8 mm, the initial resistance was high in all specimens against the $\text{Ø}20$ mm indenter (Figure 5d). Previous studies produced similar results, and it was reported that as the diameter increased, the penetration resistance of the upper face sheet also increased [16, 17].

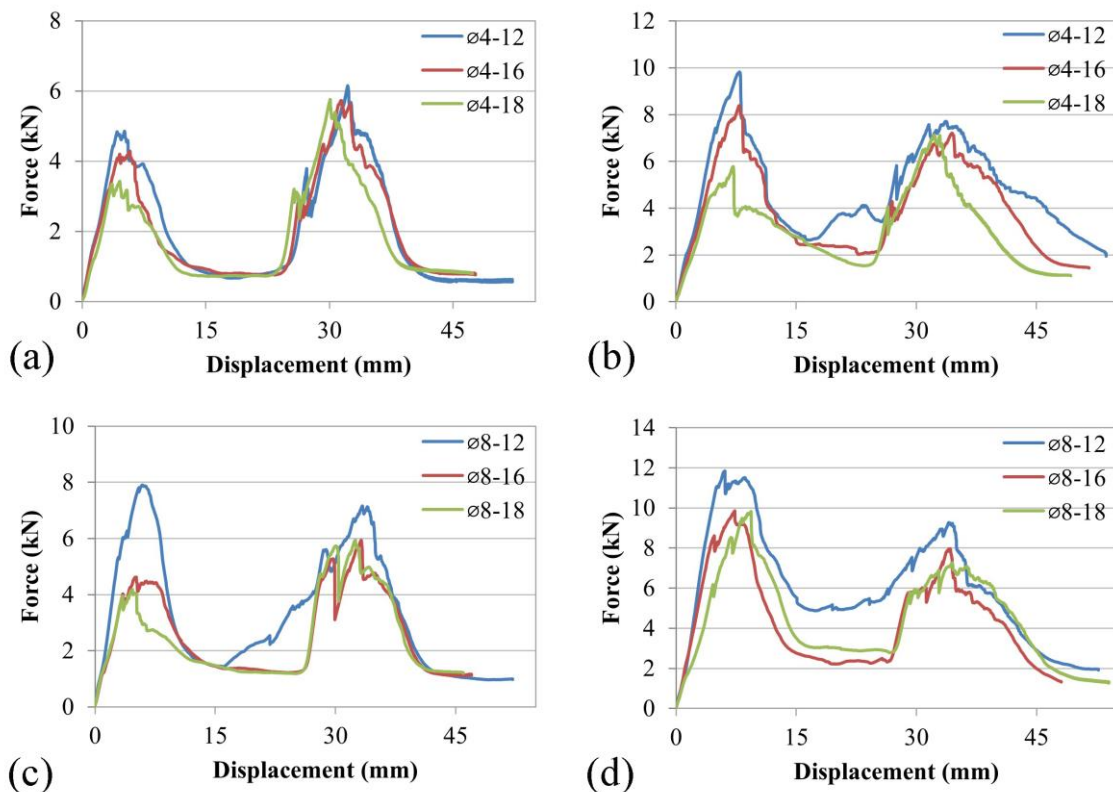


Figure 4. Force-displacement graphs of sandwich specimens, with $\text{Ø}4$ mm diameter pins tested with (a) $\text{Ø}12.7$ mm and (b) $\text{Ø}20$ mm indenters, with $\text{Ø}8$ mm diameter pins tested with (c) $\text{Ø}12.7$ mm and (d) $\text{Ø}20$ mm indenters

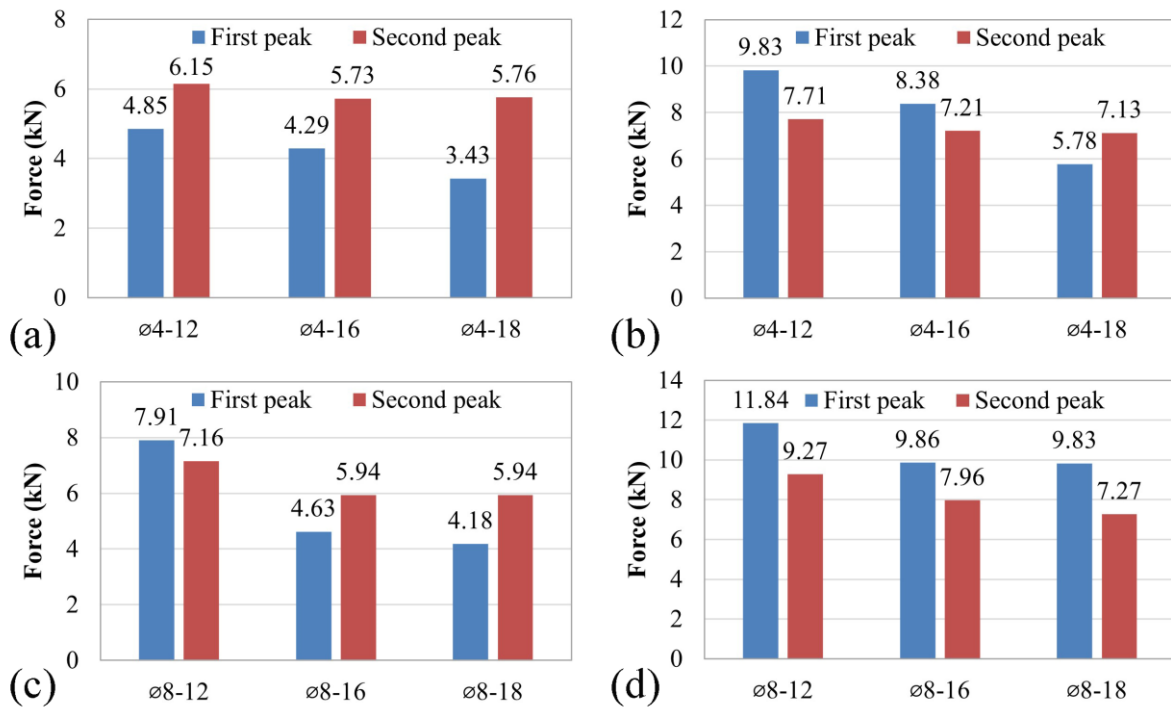


Figure 5. Contact forces of sandwich specimens, with Ø4 mm diameter pins tested with (a) Ø12.7 mm and (b) Ø20 mm indenters, with Ø8 mm diameter pins tested with (c) Ø12.7 mm and (d) Ø20 mm indenters

3.3 Absorbed energy of the pin reinforced sandwich panels

The area under the force-displacement graphs gives the absorbed energy values of the sandwich specimens. As seen in Figure 6, the highest absorbed energy values were obtained at Ø4-12 and Ø8-12 for both types of penetrating tips.

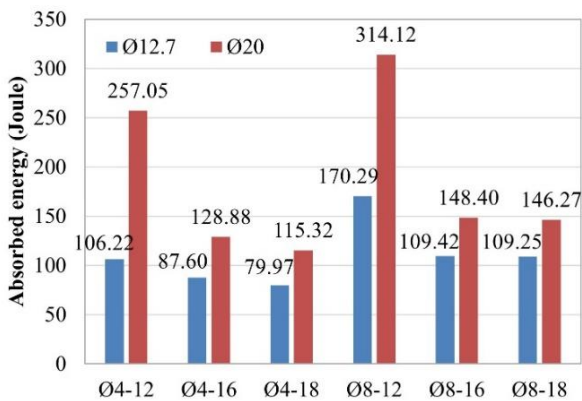


Figure 6. Absorbed energy values of sandwich specimens

This result confirms the literature, which states that foam cores with more closely spaced hole patterns absorb a larger amount of energy [17]. Additionally, energy absorption values increased with the increase in resin pin diameter [16]. In the tests performed using a 12.7 mm indenter tip, Ø4-12 specimen absorbed 21% and 33% more energy than Ø4-16 and Ø4-18 specimens, respectively. Applying the Ø20mm indenter tip resulted in higher values of 99.4% and 123% in

comparison with Ø4-16 and Ø4-18 specimens. In the tests with the 12.7mm indenter tip, the amount of energy absorbed by the Ø8-12 specimen was approximately 55.8 times higher than the Ø8-16 and Ø8-18 specimens. In testing with Ø20 mm indenter, the Ø8-12 specimen absorbed 112% and 115% more energy than the Ø8-16 and Ø8-18 specimens. The Ø8-16 and Ø8-18 specimens absorbed similar energy levels at both indenter tips.

3.4 Visual observation of indentation damage

Sandwich test samples were cut using a band saw to evaluate the damage in the cross-sections after the testing. All samples exhibited failure modes such as fibre breakage, delamination, and fibre pull-out on the upper face sheets. The bottom face sheets suffered damage from delamination and fibre breaking in the form of petalling. In the tests performed with a Ø12.7 mm indenter tip in the core section, no resin pin breakage and foam crack damage occurred in Ø4 mm reinforced foams (Figure 7a). In the Ø20 mm indenter tests, bottom face-foam core debonding occurred in the Ø4-12 specimen (Figure 7b). As seen in Figure 7b, foam cracking, and resin pin breakage damages were observed in Ø4-12 and Ø4-16 specimens with the increase in diameter of the indenter tip. The Ø4-18 specimen did not suffer any fracture of the resin pin. For specimens with 8 mm pins, the Ø12.7 mm indenter tip broke the resin pins in the Ø8-12 specimens (Figure 7c). This resulted in the highest initial peak for the Ø8-12 specimen. It has been found in the literature that the indenter tip contact with resin pins causes an increase in initial peak load [17]. Bottom face-foam core debonding and foam cracking damages became dominant in the 8 mm pin specimens tested with an indenter tip diameter Ø20 mm (Figure 7d).

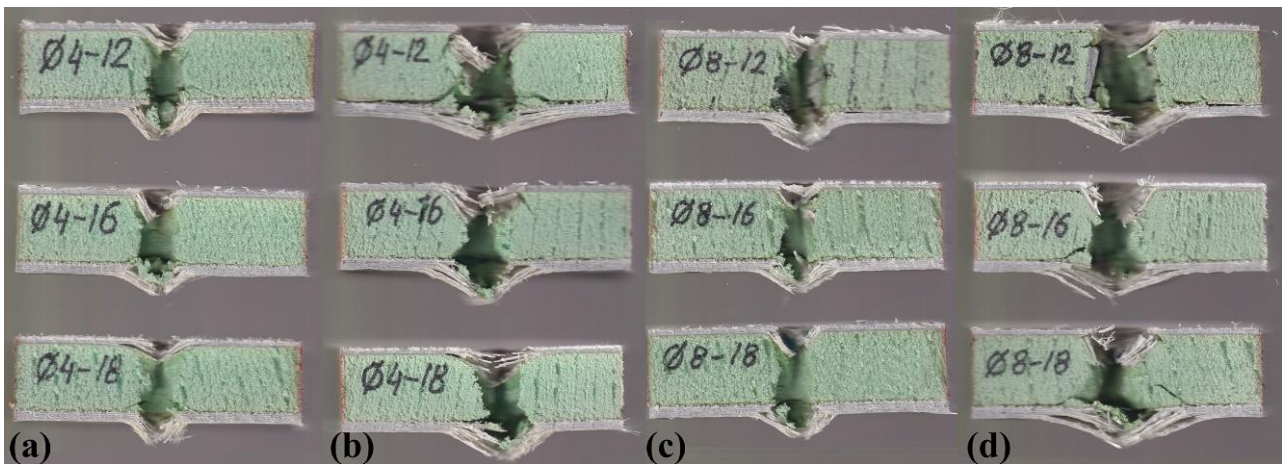


Figure 7. Cross-sectional images of damaged sandwich specimens

4 Conclusions

The present work performed experimental studies to evaluate the effect of resin pin-reinforced PVC foam on the indentation behaviour of marine sandwich composites.

- To enhance the resistance to indentation load, it is necessary to either increase the diameter of the pin reinforcements or drill holes into the foam material with closer centres.
- Frequent drilling of holes and increase in pin diameter will cause an increase in the weight of the structure.
- Small pin diameters do not provide enough resistance for small indenter tips.
- The size of the indentation object influences the initial resistance to indentation load.
- By drilling more frequent holes between the centres, the energy absorbed during indentation loading increases.
- The damage modes varied depending on the size of the indenter object in contact. A significant increase in initial force and perforation energy was achieved in case of contact between the resin pins and the indenter tip.
- An enhancement in the resistance of marine sandwich composites to indentation loads can be achieved through the application of pin reinforcement to the foam. However, applying this technique only in critical areas to prevent excessive weight gain in marine structures can provide beneficial results.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 9 %

References

- [1] F. Rubino, A. Nisticò, F. Tucci, and P. Carlone, Marine application of fiber reinforced composites: A review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8 (1), 26, 2020. <https://doi.org/10.3390/jmse8010026>.
- [2] G. Palomba, G. Epasto, and V. Crupi, Lightweight sandwich structures for marine applications: a review. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 1-26, 2021. <https://doi.org/10.1080/15376494.2021.1941448>
- [3] M. S. H. Fatt and D. Sirivolu, Marine composite sandwich plates under air and water blasts. *Marine Structures*, 56, 163-185, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2017.08.004>.
- [4] M. Roseman, R. Martin, and G. Morgan, Composites in offshore oil and gas applications. in *Marine Applications of Advanced Fibre-Reinforced Composites*: Elsevier, 233-257, 2016. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-250-1.00010-7>.
- [5] N. Gupta, S. E. Zeltmann, D. D. Luong, and M. Doddamani, Core materials for marine sandwich structures. *Marine Composites*, 187, 2018.
- [6] Q. Ma, M. Rejab, J. Siregar, and Z. Guan, A review of the recent trends on core structures and impact response of sandwich panels. *Journal of Composite Materials*, 55 (18), 2513-2555, 2021. <https://doi.org/10.1177/0021998321990734>.
- [7] L. Sutherland, A review of impact testing on marine composite materials: Part I—Marine impacts on marine composites. *Composite Structures*, 188, 197-208, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.073>.
- [8] L. Sutherland and C. G. Soares, The use of quasi-static testing to obtain the low-velocity impact damage resistance of marine GRP laminates. *Composites Part B: Engineering*, 43 (3), 1459-1467, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.01.002>
- [9] H. Zniker, B. Ouaki, S. Bouzakraoui, M. EbnTouhami, and H. Mezouara, Energy absorption and damage characterization of GFRP laminated and PVC-foam sandwich composites under repeated impacts with reduced energies and quasi-static indentation. *Case studies in construction materials*, 16, e00844, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00844>.
- [10] V. Rizov and A. Mladensky, Influence of the foam core material on the indentation behavior of sandwich composite panels. *Cellular polymers*, 26 (2), 117-131, 2007. <https://doi.org/10.1177/0262489307026002>.
- [11] M. Kazemi, Experimental investigation on the energy absorption characteristics of sandwich panels with

- layering of foam core under quasi-static punch loading. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 29 (21), 3067-3075, 2022. <https://doi.org/10.1080/15376494.2021.1885770>.
- [12] Ł. Świąch, R. Kołodziejczyk, and N. Staćel, Experimental Analysis of Perimeter Shear Strength of Composite Sandwich Structures. *Materials*, 14 (1), 12, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma14010012>.
- [13] A. Ahmed and L. Wei, Effects of indenter tips of quasi-static indentation damage of foam Sandwich Composites. *Advanced Materials Research*, 1061, 215-219, 2015. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1061-1062.215>.
- [14] C. D. M. Muscat-Fenech, J. Cortis, and C. Cassar, Impact damage testing on composite marine sandwich panels, part 1: Quasi-static indentation. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 16 (4), 341-376, 2014. <https://doi.org/10.1177/109963621452995>.
- [15] M. Garrido, R. Teixeira, J. Correia, and L. Sutherland, Quasi-static indentation and impact in glass-fibre reinforced polymer sandwich panels for civil and ocean engineering applications. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 23 (1), 194-221, 2021. <https://doi.org/10.1177/1099636219830134>.
- [16] B. Abdi, S. Azwan, M. Abdullah, A. Ayob, and Y. Yahya, Comparison of foam core sandwich panel and through-thickness polymer pin-reinforced foam core sandwich panel subject to indentation and flatwise compression loadings. *Polymer Composites*, 37 (2), 612-619, 2016. <https://doi.org/10.1002/pc.23218>
- [17] A. Eyvazian et al., Mechanical behavior of resin pin-reinforced composite sandwich panels under quasi-static indentation and three-point bending loading conditions. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 23 (6), 2127-2145, 2021. <https://doi.org/10.1177/109963622090975>.
- [18] F. Balıkoğlu, T. K. Demircioğlu, and H. Kandaş, Experimental study on the behaviour of grid-scored foam-cored sandwich composites under low-velocity and quasi-static punch shear loads. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 237 (4), 803-811, 2023. <https://doi.org/10.1177/1464420722112482>
- [19] Data sheet for Airex C70. 75 PVC foam. <https://www.metyx.com/wp-content/uploads/2020/10/TDS-AIREX-C70-E-04.2020.pdf> (accessed 28.12.2023).





2023 Kahramanmaraş depremleri sonrası Malatya ilinde yer alan yığma binaların hasar mekanizmasının incelenmesi

Investigation of damage mechanism of masonry buildings in Malatya province after 2023 Kahramanmaraş earthquakes

Alper Özmen^{1*}, Ömer Faruk Taş², Ozan İnce³, Muhammed Atar⁴, Erkut Sayın⁵

¹Inönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, 44000, Malatya, Türkiye
^{2,3,4,5}Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, 23000, Elazığ, Türkiye

Öz

6 Şubat 2023 tarihinde, yerel saatle 04:17 ve 13:24'te, sırasıyla Pazarcık ve Elbistan'da (Kahramanmaraş, Türkiye) iki yıkıcı deprem meydana gelmiştir. İlk deprem 8,6 kilometre derinlikte (Mw=7.7), ikinci deprem ise 7 kilometre derinlikte (Mw=7.7) meydana gelmiştir. Depremler, toplam nüfusu yaklaşık 15 milyon olan Hatay, Adıyaman, Gaziantep, Malatya, Kilis, Diyarbakır, Adana, Osmaniye, Şanlıurfa ve Elâzığ'da hissedilmiştir. Ayrıca, 214577 bina yıkılmış ya da ağır hasar görmüştür. Bu çalışmada, Malatya ilinde mevcut yığma binaların hasar mekanizmaları değerlendirilmiştir. Ayrıca Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'de verilen depreme dayanıklı yığma yapı tasarım kuralları üzerinde durulmuştur.

Anahtar kelimeler: 2023 Kahramanmaraş depremleri, Yığma yapılar, Deprem hasarları, Sismik performans

1 Giriş

Türkiye'nin tektonik konumundan dolayı ülkede en çok can ve mal kaybına neden olan doğal afet türü depremlerdir. İstatistiksel olarak her yıl ortalama olarak, 4.0 Mw ile 5.0 Mw arasında 200 deprem, 5.0 Mw ile 6.0 Mw arasında 25 deprem ve 6.0 Mw'nin üzerinde ise bir deprem meydana gelmektedir. [1].

Türkiye ve Suriye'de 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen iki büyük deprem, bölgede büyük yıkıma ve can kaybına neden olmuştur. Pazarcık ve Elbistan merkezli depremler, sırasıyla 7.7 ve 7.6 büyüklüğünde meydana gelmiştir. Depremler, Kahramanmaraş, Hatay, Adıyaman, Gaziantep, Malatya, Kilis, Diyarbakır, Adana, Osmaniye, Şanlıurfa ve Elâzığ illerini etkilemiştir. Depremlerin ardından 20 Şubat 2023 tarihinde Hatay'da 6.4 büyüklüğünde bir artçı deprem yaşanmıştır. Türkiye'de depremlerden en çok etkilenen il Kahramanmaraş olmuş ve depremden etkilenen illerde 50783 kişi hayatını kaybetmiştir. Suriye'de ise en az 8476 kişi hayatını kaybetmiştir. Depremler sonucunda toplam 122 binin üzerinde kişi yaralanmış ve 5 milyondan fazla kişi başka yerlere göç etmiştir. Tablo 1'de bölgede yaşanan 7.7 Mw, 7.6 Mw ve 6.4 Mw büyüklüklerindeki depremlerin merkez üslerine en yakın yerleşim yerlerini ve bu yerlere olan

Abstract

On February 6, 2023, at 04:17 and 13:24 local time, two devastating earthquakes occurred in Pazarcık and Elbistan (Kahramanmaraş, Turkey), respectively. The first earthquake was (Mw=7.7) at a depth of 8.6 kilometers, and the second earthquake was (Mw=7.6) at a depth of 7 kilometers. The earthquakes were felt in Hatay, Adıyaman, Gaziantep, Malatya, Kilis, Diyarbakır, Adana, Osmaniye, Şanlıurfa, and Elâzığ, with a total population of approximately 15 million. Also, 214577 buildings were destroyed or severely damaged. This study evaluates the damage mechanisms of existing masonry buildings in the province of Malatya. It also focuses on the earthquake-resistant masonry building design rules given in the Turkish Building Earthquake Code 2018.

Keywords: 2023 Kahramanmaraş earthquakes, Masonry structures, Earthquake damages, Seismic performance

mesafeleri verilmiştir. Depremin merkez üslerinin yerleşim yerlerine çok yakın olması depremin hasar düzeyini arttırdığı söylenebilir.

Saha gözlemleri, yapıların depreme dayanıklılığını değerlendirmek için önemli bir araçtır. Bu gözlemler sırasında, incelenen binaların yapım dönemine ait deprem yönetmelikleri, yapısal özellikleri, mühendislik kuralları ve imalat hataları incelenebilir. Bu inceleme sürecinde, konstrüktif detaylar mühendislik prensipleri de dikkate alınır. Böylece yapıların olası kusurları ve hataları tespit edilmeye çalışılır. Kırsal yerleşim yerlerinde bölgenin iklim koşullarına uygun olarak yöre halkı tarafından geleneksel yapı sistemleri ve bölgede bulunan malzemeler kullanılarak oluşturulduğu birçok yığma yapı gözlemlenmiştir. Önemli kültür miraslarının da korunduğu yığma yapılar ve bu yapılarda meydana gelen doğal afetler (deprem, heyelan, sel, çığ vd.) sonrası oluşan hasarlar birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Calayır vd. [2], 8 Mart 2010 Elazığ-Kovancılar depremi sonrasında, farklı türdeki yapı (kerpiç, yığma ve betonarme yapılar ve minareler) türlerinde meydana gelen hasarları incelemişlerdir. Sayın vd., [3], çalışmalarında 23 Haziran 2011 tarihinde meydana gelen Maden (Elazığ) depremi sonucunda yığma ve kerpiç yapıların hasarlarını araştırmışlardır. Eksik mühendislik hizmeti alan bu yapılarda

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: alper.ozmen@inonu.edu.tr (A. Özmen)

Geliş / Received: 04.12.2023 Kabul / Accepted: 11.03.2024 Yayınlanma / Published: 15.04.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1400134

meydana gelen hasarların sebeplerini detaylı olarak incelemişlerdir. Sayın vd., [4], bu çalışmalarında 2020 yılında meydana gelen Mw 6.8 Elazığ depremi sonrası bölgedeki mevcut yapıların deprem performansını incelemişlerdir. Ayrıca depremin yaşandığı bölgeyi geoteknik açıdan değerlendirmişlerdir. Nemutlu vd., [5] 2020 Elazığ depremi sonucu hasar gören Elazığ'daki betonarme binaları değerlendirmişlerdir. Çoğunlukla hasar gören binaların, Türkiye'de modern deprem yönetmeliklerinin uygulanmasından önce, 1975-1998 yılları arasında inşa edildiği tespit etmişlerdir. Günaydin vd., [6] 2020 Elazığ depreminin sismolojik karakteristiklerini sunmuşlardır. Ayrıca, deprem bölgesindeki yığma binalarda gözlenen hasar ve çökme mekanizmalarını araştırmışlardır. Temür vd., [7] Türkiye'de 2020 Elazığ-Sivrice depremi sırasında meydana gelen jeoteknik ve yapısal hasarları değerlendirmişlerdir. Piroglu & Ozakgul [8] Türkiye'de 2011 Van depremlerinden sonra yığma binalarla ilgili bir saha araştırması gerçekleştirmişlerdir.

Dünyanın birçok yerinde meydana gelmiş depremler sonrası, farklı yapı türlerinin incelendiği, ulusal ve uluslararası birçok çalışma mevcuttur [9–11].

Bu çalışma kapsamında 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrası Malatya ilinde yer alan yığma yapıların hasar mekanizması değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında yığma yapılarda meydana gelen hasarların önlenmesi amacıyla öneriler sunulmuştur.

2 2023 Kahramanmaraş depremlerinin karakteristik özellikleri

Türkiye dünyanın sismik açıdan en aktif bölgelerinden biridir. Doğu Anadolu Fayı (DAF) Malatya il sınırları içerisinde geçmektedir [12]. DAF Türkiye'nin doğusunda yer alan, Anadolu ile Arap Levhalarının çarpışmasına bağlı olarak oluşan doğrultu atımlı bir fay sistemidir [13]. DAF zonu yer yer genişliği 30 km uzunluğu ise 580 km'yi bulan, Karlıova (Bingöl) ile İskenderun körfezi arasında uzanan kuzeydoğu doğrultulu fay sistemidir [14,15]. Duman ve Emre [14] DAF'ı üç ana kola ayırmıştır. Ana (Güney) kol,

Karlıova ile Çelikhan ve güneydoğu devamında Erkenek, Pazarcık ve Türkoğluna doğru devam eder. Kuzey kol ise Çelikhan ile Güneydoğu Toros Dağlarının morfolojisini takip ederek kuzeye doğru dışbükey bir yay şekli oluşturur. Bu kuzey kol, Sürgü Fayı, Çardak Fayı ve Göksun'dan doğuya dönerek Savrun, Çokak ve Toprakkale faylarından oluşur. Karasu çukurluğu DAF ile Ölü Deniz Fayı (ÖDF) arasında genişlemeli bir bölüm olarak ifade edilip, Narlı, Yesemek, Reyhanlı ve Antakya segmentlerine ayrılmıştır (Şekil 1).

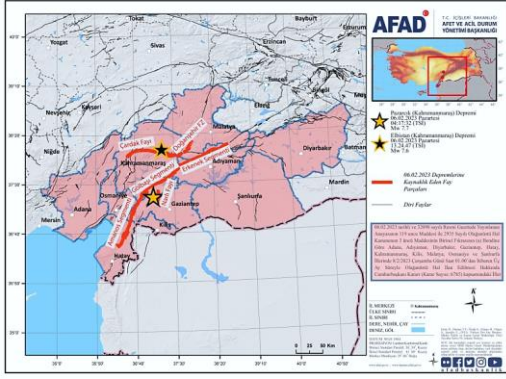
DAF, tarih boyunca pek çok yıkıcı depreme kaynaklık etmiştir [15]. DAF üzerinde gerçekleşen son yıkıcı depremler, 06.02.2023 günü, Türkiye saati ile 04:17'de ve 13:24'de sırası ile merkez üssü Pazarcık (Kahramanmaraş) ve Elbistan (Kahramanmaraş) olan Mw 7.7 ve Mw 7.6 büyüklüğünde iki deprem meydana gelmiştir [1].

Bu depremlerin merkez üsleri, sırasıyla DAF'ın güney ve kuzey kolları üzerine düşmektedir [1]. Bu depremlere ait büyüklük ve derinlik de dâhil olmak üzere deprem detayları, çeşitli ulusal ve uluslararası kurumların raporlarına dayanarak Tablo 2' de verilmiştir. Türkiye Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) verilerine göre deprem bölgesindeki yıkık/acil yıkılacak bina sayısı 58039, ağır hasarlı bina sayısı ise 205534 olarak verilmektedir [1]. Kahramanmaraş depremlerinden en çok etkilenen iller arasında yer alan Malatya'da binaların yaklaşık %50'si hasar görmüş veya yıkılmıştır. Malatya'da, yaklaşık 45000 bina yıkık, acil yıkılacak veya ağır hasar durumundadır [16].

6 Şubat 2023 tarihinde Türkiye'nin güneydoğusunda meydana gelen Mw 7.7 ve Mw 7.6 büyüklüğündeki depremler, bölgedeki deprem aktivitesini önemli ölçüde artırmıştır. Bu depremler sonrasında, 6 Şubat- 6 Mayıs tarihleri arasındaki periyotta, bölgede büyüklükleri Mw 0.2 - 6.6 arasında olan toplam 33591 deprem kaydedilmiştir. Bu depremlerden 4.0 ile 5.0 arasında büyüklüğe sahip 550 deprem kaydedilirken, 5.0 ile 6.0 arasında 48 adet ve 6.0 ile 7.0 arasında 2 adet deprem kaydedilmiştir. Artçı şok aktivitesinin görsel olarak temsili Şekil 2' de sunulmuştur.

Tablo 1. Kahramanmaraş ve Hatay'da meydana gelen depremlerin merkez üssüne olan mesafeleri [1]

Büyüklik	Merkez üssü	İlçe	Yerleşim Merkezi	Mesafe (km)
7.7 M _w	Pazarcık (Kahramanmaraş)	Pazarcık	Akdemir	2.72
		Pazarcık	Karahüyük	2.84
		Türkoğlu	Cennetpınarı	3.75
		Pazarcık	Evri	4.48
		Pazarcık	Emiroğlu	4.94
7.6 M _w	Elbistan (Kahramanmaraş)	Elbistan	Gümüşdöven	1.70
		Ekinözü	Akpınar	2.09
		Elbistan	Özcanlı	4.90
		Ekinözü	Maarif	5.47
		Ekinözü	Ekinözü	5.72
6.4 M _w	Yayladağı (Hatay)	Yayladağı	Sevenoba	1.02
		Yayladağı	Çakıköy	1.17
		Yayladağı	Karaköse	1.20
		Samandağ	Meydan	3.23
		Samandağ	Gözene	3.26



Şekil 1. Doğu Anadolu Fayına ait fay parçaları [17]

Tablo 2. Pazarcık ve Elbistan depremlerinin özellikleri

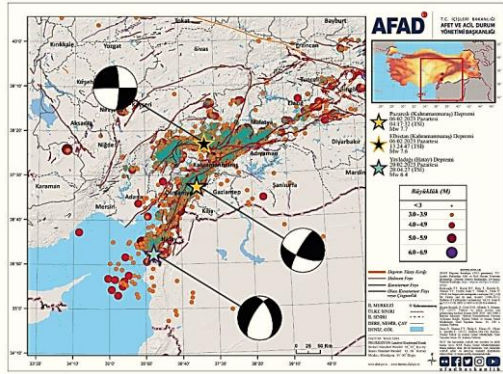
Mw= 7.7 Pazarcık depremi			Mw= 7.6 Elbistan depremi		
Ensitüti	Derinlik (km)	Mw	Ensitüti	Derinlik (km)	Mw
AFAD ¹	8.6	7.7	AFAD ¹	8.6	7.7
KOERI ²	10	7.7	KOERI ²	10	7.7
USGS ³	17.9	7.8	USGS ³	17.9	7.8
EMSC ⁴	10	7.7	EMSC ⁴	10	7.7

¹Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı

²Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü

³Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu

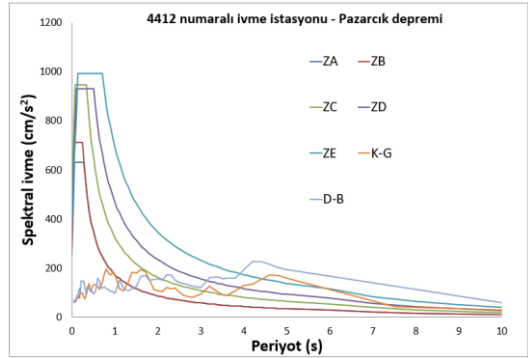
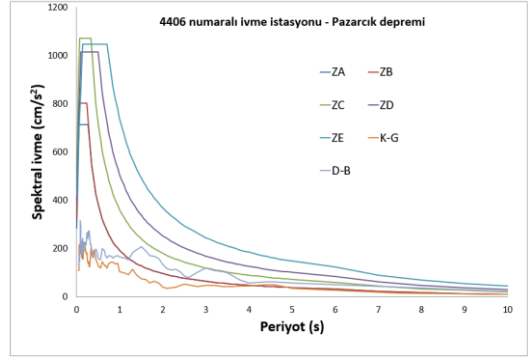
⁴Avrupa-Akdeniz Sismoloji Merkezi



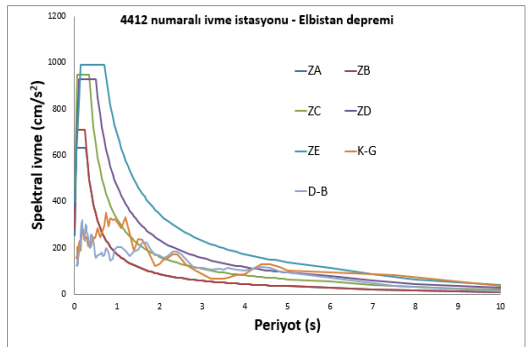
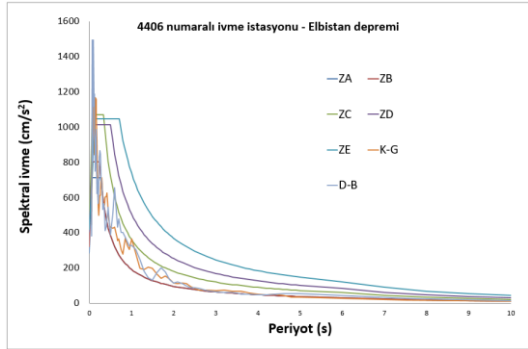
Şekil 2. 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrası kaydedilen artçı şoklar (6 Şubat – 6 Mayıs arası) [1]

Şekil 3 ve Şekil 4'te Pazarcık ve Elbistan depremlerine ait deprem spektrumları ile 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY 2018) verilen tasarım depremi Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD2) spektrumları karşılaştırılarak Malatya ili üzerindeki depremlerin etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Spektrum grafikleri incelendiğinde Elbistan depreminin, Pazarcık depremine kıyasla Malatya ili için daha etkili olduğu görülmektedir. Elbistan depremi spektrumu, DD2 spektrumunu daha geniş bir aralıkta aşmıştır. Bu durum, Elbistan depreminin

Malatya'da daha fazla yapısal hasara yol açtığını göstermektedir.



Şekil 3. Pazarcık depremine ait deprem spektrum grafikleri (Malatya ili 4406 ve 4412 numaralı istasyonları)



Şekil 4. Elbistan depremine ait deprem spektrum grafikleri (Malatya ili 4406 ve 4412 numaralı istasyonları)

3 Yığma yapılarda meydana gelen hasar mekanizmaları

Çalışmanın bu bölümünde Malatya ilinde yer alan yığma yapılar ve bu yapıların deprem sonrası hasar modları incelenmiştir. Çalışma kapsamında incelenen yapılara ait yaklaşık konumlar Şekil 5’te görülmektedir. Malatya’da yapılan incelemeler, kent merkezinin genellikle betonarme, kırsal kesimin ise çoğunlukla yığma binalardan oluştuğunu göstermiştir. Yapılan saha gözlemlerinde hem şehir merkezindeki betonarme binalarda hem de Doğanşehir, Akçadağ ve Darendede gibi kırsal bölgelerdeki yığma binalarda yapısal ve yapısal olmayan hasarlar gözlemlenmiştir. Malatya’nın kırsal kesimlerinde bulunan yığma binaların büyük bir kısmı mühendislik hizmeti almamıştır. Bu binalar, genellikle kerpiç veya taştan inşa edilmiştir. Depremden sonra yapılan incelemelerde, kırsal kesimdeki birçok yığma binanın yıkıldığı veya ağır hasar gördüğü gözlemlenmiştir. Malatya’nın merkez ilçelerinden olan Battalgazi ve Yeşilyurt ilçelerinde de taş ve kerpiçten inşa edilen yığma yapıların sayısı fazladır. Bu ilçelerde yer alan yığma yapıların önemli bir kısmı hasar görmüştür.

Gözlemlenen hasar mekanizmaları; köşe hasarları, düzlem dışı davranış hasarları, düzlem içi davranış hasarları, yanlış konumlandırılmış boşluklar, kalkan duvar hasarları ve düşük dayanımlı yığma birimlerin kullanımı olarak gruplandırılmıştır. Çalışma kapsamında, Malatya şehir merkezi, Battalgazi, Yeşilyurt, Doğanşehir ve Doğanyol ilçelerinde olmak üzere yaklaşık 150 yığma yapı incelenmiştir. İncelenen binaların büyük çoğunluğu harman tuğlası ile inşa edilmiştir.



Şekil 5. Çalışma kapsamında incelenen bölgeler

3.1 Köşe hasarları

Yığma binalarda bölgesel hasarların ve göçmenin önlenmesinde, birbirine dik olarak bağlanan duvarlar arasındaki bağlantı oldukça önemlidir. Yapılan saha çalışmalarında Malatya bölgesinde yapılan yığma yapılarda, köşe bağlantı detaylarına gerekli özenin gösterilmediği gözlemlenmiştir. Köşe hasarları, taşıyıcı duvarlar arasında yeterli bağlantı olmaması, kötü malzeme kalitesi ve kötü işçilik nedeniyle meydana gelir [18]. İncelenen yapılarda, duvarlar arasındaki zayıf bağlantılar, düşey ve yatay

hatılların eksikliği önemli köşe hasarlarına neden olmuştur. Yığma binalarda gözlemlenen köşe hasarları Şekil 6’ da verilmiştir.

3.2 Düzlem dışı davranış hasarları

Yığma duvarlar deprem hareketine dik doğrultuda zayıf bir davranışa sahiptir. Bu nedenle kesme kuvvetleri duvar düzleminde etkili olur ve düzlem içi bir mekanizma oluşur. Buna ek olarak duvar düzlemine dik doğrultuda eğilme davranışı gelişir. Bu durum düzlem dışı mekanizmaya neden olur. Mesnetlenmemiş uzun duvarlar, zayıf duvar- döşeme bağlantısı ya da zayıf duvar-duvar bağlantısı düzlem dışı davranış hasarlarının oluşmasının başlıca sebeplerdendir. Buna ek olarak, döşemelerin ahşap kirişlerle taşındığı durumlarda kirişlerin tek doğrultuda yerleştirilmesi durumunda, kirişlere paralel yönde olan duvarlarda düzlem dışı davranış hasarları ortaya çıkabilmektedir.

Bu hasarların önlenmesi amacıyla mesnetlenmemiş uzun duvarlardan kaçınılmalı, betonarme yatay ve düşey hatıllar inşa edilmeli ve döşeme bağlantılarında rijit diyafram sağlanmalıdır.

Düzlem dışı davranış hasarı meydana gelen yapılarda birbirine dik duvarların bağlantıları doğru bir şekilde sağlanmalıdır. Bu amaçla çeşitli güçlendirme teknikleri önerilmiştir. Duvar köşeleri çelik levha ile birbirine bağlanmalı ve ankrajlanmalıdır. Daha sonra, duvarlardaki çivi delikleri hazır harç enjeksiyonu kullanılarak kaplanmalıdır. Ayrıca duvarla beraber çalışacak düşey hatılları sisteme eklenmelidir. Başka bir yöntem olarak ise mevcut duvarların etrafına betonarme veya çelik bir çerçeve yerleştirilerek duvarların devrilmesi ve yatay kayması engellenebilir.

Malatya da yapılan incelemelerde gözlemlenen düzlem dışı davranış hasarları Şekil 7’ de görülmektedir.



Şekil 6. Köşe hasarları

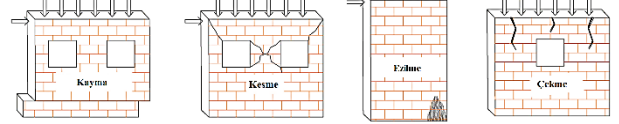


Şekil 7. Düzlem dışı davranış hasarları

3.3 Düzlem içi davranış hasarları

Yığma yapıların deprem performansları, düzlem içi rijitliği ile yakından ilişkilidir. Düzlem içi mekanizma, deprem kuvvetinin, duvar düzlemi doğrultusunda etkimesi durumunda ortaya çıkmaktadır. Düzlem içi mekanizma, kayma, kesme, eğilme, çekme ve ezilme gibi farklı hasarlara sebep olabilmektedir. Zaman zaman ise bu hasarlar birlikte görülmektedir. Tipik düzlem içi hasar mekanizmaları Şekil 8’ de verilmiştir. Özellikle betonarme düşey hatlıların olmaması, duvar üzerimde, birbirine yakın ve büyük açıklıklar bulunması durumunda düzlem içi davranış mekanizması ortaya çıkabilmektedir. Malatya da gözlemlenen düzlem içi davranış hasarları Şekil 9’da paylaşılmıştır.

Düzlem içi davranış hasarlarının önlenmesinde geçmişte yapılmış çalışmalarda önerilen farklı güçlendirme teknikleri mevcuttur. Bunlardan en sık tercih edileni, yığma duvarların hasır çelik donatılı özel sıva ile güçlendirilmesidir. Bu yöntemde mevcut duvara ankrajlanan çelik hasır donatı üzerine püskürtme beton uygulanarak duvarın düzlem içi dayanımının artırılması amaçlanmıştır. Bu uygulama duvarın bir veya iki yüzeyine uygulanabilmektedir. Ayrıca duvarın çekme dayanımının artırılması için lifli polimerlerde, duvara sarılabilmektedir. Literatürde farklı sargılama teknikleri önerilmektedir. Sargı malzemesi, FRP, cam, aramid ve karbon gibi yüksek mukavemetli liflere sahip kompozit malzeme içerir. Mevcut yığma binaları güçlendirmek için FRP, mukavemet ve süneklik açısından mevcut malzemelerden daha iyi olan önemli özellikler sağlar.



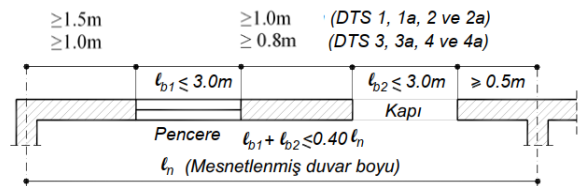
Şekil 8. Tipik düzlem içi davranış mekanizmaları [19].



Şekil 9. Düzlem içi davranış hasarları

3.4 Uygun olmayan duvar boşlukları (kapı ve pencereler)

Duvarlardaki açıklıkların yanlış yerleştirilmesi ve boyutlandırılması, depremler sırasında yığma binalarda önemli hasara yol açabilir [20]. TBDY-2018’de iki açıklık arasındaki mesafe, pencere ve kapıların uzunluğu ve bir açıklık ile duvar köşesi arasındaki açıklık için belirli sınırlar bulunmaktadır. Deprem bölgesinde incelenen yapıların birçoğunda açıklıkların yönetmelikte belirtilen sınırlara uymadığı ve yapıların bu nedenle hasar gördüğü görülmüştür. TBDY-2018’de yığma yapılarda uygulanabilecek açıklık sınırları Şekil 10’da verilmiştir. Buna ek olarak, kapı ve pencerelerin üst bölümlerinde mutlaka lentolar inşa edilmelidir. Lentoların yüksekliği 15 cm’ den duvara oturan genişliği ise 20 cm’ den az olmamalıdır. Malatya ilinde uygun olmayan açıklık uygulamaları sonucu gözlemlenen yığma yapı hasarları Şekil 11’de verilmiştir.



Şekil 10. Duvar boşlukları için TBDY-2018’ de belirtilen sınırlar [21].



Şekil 11. Uygun olmayan duvar boşlukları nedeniyle meydana gelen hasarlar

3.5 Düşük dayanımlı yığma birimler

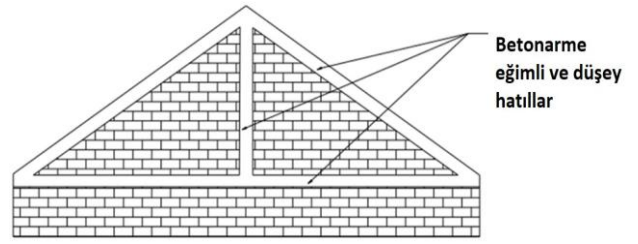
Taşıyıcı duvarlar, yapının ağırlığını ve diğer yükleri taşımakla sorumludur. Bu nedenle, taşıyıcı duvarlar için kullanılan malzemelerin yüksek mukavemete sahip olması ve depreme dayanıklı olması önemlidir. TBDY-2018'e göre, taşıyıcı duvarlar için, içi boş beton briketler, dolgu tuğlaları, kerpiç tuğlalar, moloz taşlar, benzer şekilli birimler kullanılmamalıdır. TBDY-2018'e göre, duvar birimlerinin minimum basınç dayanımı 5 MPa olmalıdır. Basınç gerilmesi duvar birimlerinin basınç dayanımını aşarsa, duvar birimlerinde küçük dikey çatlaklar oluşabilir. Şekil 12'de düşük dayanımlı yığma birimlerin kullanılması sonucu hasar görmüş yapılar paylaşılmıştır.



Şekil 12. Düşük dayanımlı yığma birimler nedeniyle meydana gelen hasarlar

3.6 Kalkan duvar hasarları

Kalkan duvarlar, iki dik duvar ve bunları birbirine bağlayan bir eğimli duvardan oluşan duvarlardır. Bu duvarlar, genellikle balkonlar, teraslar ve merdivenler gibi dış mekân yapılarını desteklemek için kullanılır. Kalkan duvarlar genellikle, yatay ve düşey hatıllar olmadan inşa edilirler ve bu nedenle deprem karşısında hasar görebilmektedirler. Hatıllar kalkan duvarın stabilitesini arttırarak bir bütün olarak hareket etmesine katkı sağlar. TBDY- 2018' de kalkan duvarların 0.8 m'yi aşması durumunda, düşey ve eğimli hatıllar inşa edilmesi gerekmektedir. Kalkan duvarlarda, hatılların kullanımı ile ilgili tipik bir görsel Şekil 13' de gösterilmiştir. 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrası Malatya ilinde gözlemlenen kalkan duvar hasarları Şekil 14' de verilmiştir.



Şekil 13. Kalkan duvarlarda uygun hatıl yerleşimi



Şekil 14. Yığma binalarda kalkan duvarlar hasarları

4 Sonuçlar ve öneriler

Bu çalışma kapsamında, 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrasında mevcut yığma yapılarda meydana gelen hasar modlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla Malatya ilinde bulunan yığma yapılar incelenmiştir. Bu yapılarda meydana gelen hasar modları ve hasarların önlenmesi için gerekli teknikler değerlendirilmiştir. Çalışma neticesinde aşağıda belirtilen sonuçlar ortaya çıkmıştır.

- Binaların köşeleri, duvarlar arasındaki yetersiz bağlantılar ile düşey ve yatay hatılların eksikliği nedeniyle hasar görmüştür. Bu tür hasarları önlemek için düşey ve yatay hatılların kullanılması önemlidir.

- Yığma binalar, bölgede önemli bir yapısal hasar olan düzlem dışı mekanizmaya karşı savunmasızdır. Bu hasar, birbirine dik duvarlar arasındaki zayıf bağlantılar, dikey ve yatay hatılların olmaması ve uzun desteksiz duvarların inşa edilmesi gibi çeşitli hatalardan kaynaklanmaktadır.

- Taşıyıcı duvarların yapısal performansı, hatılların olmaması ve yanal rijitliği azaltan büyük boşlukların varlığı nedeniyle zayıflayabilir. Bu durum, yer hareketi sırasında

artan kesme kuvveti nedeniyle düzlem içi hasarlara yol açabilir. Düzlem içi hasarları önlemek için, büyük boşluklar inşa etmekten kaçınmak ve boşlukların yanında düşey hatlılar inşa etmek önemlidir.

- Kalkan duvarlar genellikle hatlılar olmadan inşa edilir ve bu da onları deprem kuvvetlerine karşı savunmasız hale getirir. Bu tür bir hasar ana yapısal sorun olmasa da kalkan duvarların düşen parçaları öngörülemez zararlara ve can kaybına neden olabilir. Düşey ve eğimli betonarme hatlıların kullanılması kalkan duvar hasarlarını en aza indirir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %17

Kaynaklar

- [1] AFAD, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Turkey, Ankara, 2020.
- [2] Y. Calayır, E. Sayın, B. Yön, Performance of structures in the rural area during the March 8, 2010 Elazığ-Kovancılar earthquake. *Natural Hazards*, 61, 703–717, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-0056-6>.
- [3] E. Sayın, B. Yön, Y. Calayır, M. Karaton, Failures of masonry and adobe buildings during the June 23, 2011 Maden-(Elazığ) earthquake in Turkey, *Eng Fail Anal.* 34 (2013) 779–791. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.10.016>.
- [4] E. Sayın, B. Yön, O. Onat, M. Gör, M.E. Öncü, E. Tuğrul Tunç, D. Bakır, M. Karaton, Y. Calayır, 24 January 2020 Sivrice-Elazığ, Turkey earthquake: geotechnical evaluation and performance of structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19, 657–684, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-01018-4>.
- [5] O.F. Nemutlu, B. Balun, A. Sari, Damage assessment of buildings after 24 January 2020 Elazığ-Sivrice earthquake. *Earthquakes and Structures*, 20, 325–335, 2021. <https://doi.org/10.12989/eas.2021.20.3.325>.
- [6] M. Günaydın, B. Atmaca, S. Demir, A.C. Altunişik, M. Hüsem, S. Adanur, Ş. Ateş, Z. Angin, Seismic damage assessment of masonry buildings in Elazığ and Malatya following the 2020 Elazığ-Sivrice earthquake, Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19, 2421–2456, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01073-5>.
- [7] R. Temür, E. Damcı, S. Öncü-Davas, C. Öser, S. Sargın, Ç. Şekerci, Structural and geotechnical investigations on Sivrice earthquake (Mw= 6.8), January 24, 2020. *Natural Hazards*, 106, 401–434, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04468-w>.
- [8] F. Piroglu, K. Ozakgul, Site investigation of masonry buildings damaged during the 23 October and 9 November 2011 Van Earthquakes in Turkey. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 13, 689–708, 2013. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-689-2013>.
- [9] O. İnce, M. Atar, Ö.F. Taş, A. Özmen, E. Sayın, Betonarme Prefabrik Endüstri Yapılarının 6 Şubat 2023 Depremleri Sonrası Hasarlarının İncelenmesi. *Türk Deprem Araştırma Dergisi* 5, 291–300, 2023. <https://doi.org/10.46464/tdad.1337277>.
- [10] E.A. Godínez-Domínguez, A. Tena-Colunga, L.E. Pérez-Rocha, H.I. Archundia-Aranda, A. Gómez-Bernal, R.P. Ruiz-Torres, J.L. Escamilla-Cruz, The September 7, 2017 Tehuantepec, Mexico, earthquake: Damage assessment in masonry structures for housing. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 56, 102123, 2021.
- [11] M. Indirli, L.A. S. Kouris, A. Formisano, R.P. Borg, F.M. Mazzolani, Seismic damage assessment of unreinforced masonry structures after the Abruzzo 2009 earthquake: The case study of the historical centers of L'Aquila and Castelvechio Subequo. *International Journal of Architectural Heritage* 7, 536–578, 2013. <https://doi.org/10.1080/15583058.2011.654050>.
- [12] Ö. Emre, T.Y. Duman, S. Özalp, H. Elmacı, Ş. Olgun, F. Şaroğlu, Açıklamalı Türkiye Diri Fay Haritası, Ölçek 1: 1.250. 000. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi 30, 89, 2013.
- [13] M. Köküm, Landsat TM görüntüleri üzerinden doğu anadolu fay sistemi'nin Palu (Elazığ)-Pütürge (Malatya) arasındaki bölümünün çizgisellik analizi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 9 (2019) 119–127.
- [14] T.Y. Duman, Ö. Emre, The East Anatolian Fault: geometry, segmentation and jog characteristics. *Geological Society, London, Special Publications* 372, 495–529, 2013.
- [15] M. Köküm, F. Özçelik, An example study on re-evaluation of historical earthquakes: 1789 Palu (Elazığ) earthquake, Eastern Anatolia, Turkey. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration* 161, 157–170, 2020. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.603929>.
- [16] T.C. Malatya Valiliği, 08.05.2023 Deprem Durum Çizelgesi, 2023.
- [17] Ö. Emre, T.Y. Duman, S. Özalp, F. Şaroğlu, Ş. Olgun, H. Elmacı, T. Çan, Active fault database of Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering* 16, 3229–3275, 2018.
- [18] B. Yön, Identification of failure mechanisms in existing unreinforced masonry buildings in rural areas after April 4, 2019 earthquake in Turkey. *Journal of Building Engineering*. 43, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102586>.
- [19] M. Tomazevic, Earthquake-resistant design of masonry buildings, World Scientific, 1999.
- [20] A. Özmen, M.M. Maraş, Y. Ayaz, E. Sayın, Assessments of Masonry Buildings and Historical Structures during the 2020 Sivrice-Elazığ Earthquake. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2023.
- [21] TBDY- 2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Resmî Gazete, Sayı: 30364 (Mükerrer), 2018.





Performance comparison of visual transformer based models for shoulder implant classification

Omuz implantı sınıflandırmasında görü dönüştürücü tabanlı modellerin performans karşılaştırması

Elif Baykal Kablan^{1,*} , Yavuz Kablan² 

¹ Karadeniz Technical University, Software Engineering Department, 61080, Trabzon, Türkiye

² Karadeniz Technical University, Electrical and Electronics Department, 61080, Trabzon, Türkiye

Abstract

Total shoulder arthroplasty (TSA) is a surgical procedure addressing severe pain and restricted shoulder joint movement. During TSA surgery, X-ray images guide the selection of the prosthetic implant suitable for the patient from a variety of models produced by different manufacturers. However, prostheses may wear or loosen over time, thus requiring periodic evaluation and replacement. Currently, the process involves taking new X-ray images from patients, resulting in variability in expert opinions on implant types. Therefore, there is a need for highly accurate automated diagnostic systems to help recognize unknown implants. In this study, we present a performance comparison of vision transformer (ViT) based models for automatic shoulder implant classification from X-ray images. Fine-tuning of pre-trained ViT models on a publicly available shoulder X-ray dataset showed high success in terms of accuracy, precision, sensitivity, and F-measure metrics. The Swin-B model yielded the highest results with 93.84% accuracy, 88.15% precision, and 85.52% recall. These results showed that ViT based models can help improve treatment planning by providing reliable identification of shoulder implant manufacturers and model information and time efficiency, especially for specialists.

Keywords: Total shoulder arthroplasty, Shoulder implants, X-ray, Classification, Vision transformer

1 Introduction

The shoulder is one of the most complex and commonly used joints in the body. Total shoulder arthroplasty (TSA) is a surgical procedure performed on patients who experience severe pain and restricted movement in the shoulder joint due to conditions such as osteoarthritis and rheumatoid arthritis [1-3]. During TSA surgery, the dysfunctional joint is removed, and a prosthetic implant is inserted in its place. X-ray images are used to determine the appropriate type of prosthesis. This surgical intervention aims to alleviate pain and improve joint function, allowing patients to regain mobility and enhance their overall quality of life.

Öz

Total omuz artroplastisi (TSA), şiddetli ağrı ve kısıtlı omuz eklemi hareketini ele alan cerrahi bir prosedürdür. TSA ameliyatı sırasında röntgen görüntüleri, farklı üreticiler tarafından üretilen çeşitli modeller arasından hastaya uygun protez implantın seçimine rehberlik etmektedir. Bununla birlikte, protezler zamanla aşınabilir veya gevşeyebilir, bu nedenle periyodik değerlendirme ve değiştirme gerektirmektedir. Halihazırda bu süreç, hastalardan yeni röntgen görüntülerinin alınmasını gerektirmekte ve implant tiplerine ilişkin uzman görüşlerinde değişkenliğe neden olmaktadır. Bu nedenle, bilinmeyen implantları tanımaya yardımcı olacak yüksek doğrulukta otomatik teşhis sistemlerine ihtiyaç vardır. Bu çalışmada, X-ray görüntülerinden otomatik omuz implantı sınıflandırması için görü dönüştürücü (ViT) tabanlı modellerin performans karşılaştırması sunulmaktadır. Önceden eğitilmiş ViT modellerinin herkese açık bir veri kümesi üzerinde ince ayarı doğruluk, hassasiyet, duyarlılık ve F-ölçümü metriklerinde yüksek başarı göstermiştir. Swin-B modeli %93.84 doğruluk, %88.15 kesinlik ve %85.52 duyarlılık ile en yüksek sonuçları vermiştir. Bu sonuçlar, ViT tabanlı modellerin omuz implantı üreticilerinin ve model bilgilerinin güvenilir bir şekilde tanımlanmasını ve özellikle uzmanlar için zaman verimliliği sağlayarak tedavi planlamasının iyileştirilmesine yardımcı olabileceğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Total omuz artroplastisi, Omuz implantları, X-ray, Sınıflandırma, Görü dönüştürücü

Nowadays, there are several manufacturers of shoulder prosthetics, each offering different models tailored to individual patients. Despite the advancements in prosthetic materials and surgical techniques, prostheses may experience wear or loosen over time. Therefore, it is essential to periodically evaluate the condition of the prosthesis after the surgery and replace it if necessary [4]. Additionally, in cases of accidents or injuries, the existing prosthesis might get damaged and require replacement. To ensure a rapid and successful process of prosthesis improvement or replacement, it is crucial for both the patient and the doctor to be aware of the manufacturer and model information. However, incomplete medical records may lead to uncertainty in such

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ebykal@ktu.edu.tr (E. Baykal Kablan)
Geliş / Recieved: 05.12.2023 Kabul / Accepted: 12.03.2024 Yayınlanma / Published: 15.04.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1400666

situations. Consequently, a thorough examination by medical experts is conducted by obtaining new X-ray images from the patient to verify the manufacturer and model information of the prosthesis. Due to the reliance on expert opinions, time consumption, and the taxing nature of this examination, there is a demand for automated systems to aid in this process.

The contributions of automated systems are as follows:

- **Fast and efficient results:** Automated systems quickly analyze X-ray images and provide instant results. This reduces waiting times for patients and accelerates the treatment process.
- **High precision and accuracy:** Machine learning algorithms work with large datasets to achieve high precision and accurate results. This ensures the correct identification of shoulder implants.
- **Objective decision-making:** Automated systems can make objective decisions without being influenced by human factors. This eliminates the risk of misinterpretation or personal biases.
- **Continuous improvement:** Automated systems can be updated with new datasets and continue learning. This allows the system to improve its performance over time.
- **Reduces expert workload:** Automated systems alleviate the burden on experts by eliminating the need to manually review X-ray images continuously. It enables experts to use their time more efficiently.

In summary, automated systems offer rapid, accurate, and efficient results, leading to better healthcare services and increased patient satisfaction. Moreover, they help healthcare professionals by reducing their workload and improving the overall efficiency of the treatment process.

Traditional machine learning methods, such as support vector machines and decision trees, often necessitate manual feature engineering and struggle with complex, high-dimensional data. The reduced utilization of classical machine learning approaches in biomedical image processing can be primarily attributed to their limitations in automatically extracting intricate features and patterns from extensive datasets. In recent years, however, the ability of deep learning to automatically learn from data, perform hierarchical feature extraction, and demonstrate versatility has positioned it as a powerful and preferred approach in biomedical image processing tasks. This has contributed to remarkable advancements in medical diagnosis and patient care. For a more detailed discussion and comparison, readers are referred to research papers [5, 6]. In the literature, several deep learning-based studies have been proposed for the detection and classification of shoulder implants from X-ray images [4, 7-12]. To get an idea about the effectiveness and applicability of deep learning in addressing the complexity of shoulder implant detection and classification from X-ray images, we can summarize these studies as follows.

Urban et al. fine-tuned six different pre-trained deep learning CNN architectures (VGG-16, VGG-19, ResNet-50, ResNet-152, NASNet, DenseNet-201) for the classification of shoulder implants on shoulder implant dataset [7]. The dataset consists of 597 X-ray images of shoulder implants, involving 16 different models from four different implant manufacturers. Through 10-fold cross-validation, they achieved the highest classification performance with an accuracy of 80.4% using the NASNet architecture. Yi et al. used a different dataset containing 482 X-ray images of

shoulder implants belonging to five different implant models [8]. Instead of training a single classifier for all implant models, they trained five separate ResNet-152 architectures as binary classifiers for each implant model. Through 20-fold cross-validation, they achieved AUC-ROC values ranging from 0.86 for Solar to 1.0 for Zimmer, indicating varying levels of performance for different implant models. However, using multiple classifiers may add complexity to the overall system and require more computational resources. Yilmaz proposed a multi-channel CNN model that introduces a novel channel selection layer for choosing the most prominent feature filters [9]. By applying effective feature selection among channels for each image, the model significantly improved the accuracy rate. The proposed method achieved a higher performance with an accuracy rate of 97.2%. Sultan et al. proposed a CNN-based method for the classification of shoulder implants [10]. They used rotational data augmentation to increase the training dataset by 36 times. Modified ResNet and DenseNet network models were combined in depth to form the DRE-Net network ensemble architecture. Through 10-fold cross-validation, they achieved an accuracy of 85.92%, an F1 score of 84.69%, a precision of 85.33%, and a recall of 84.11%. Efeoglu et al. evaluated 12 different classifiers to classify shoulder implants from three different manufacturers [11]. By employing 10-fold cross-validation, they found that the K-NN algorithm achieved the highest accuracy of 74%, outperforming the other algorithms. Sivari et al. proposed ten distinct hybrid classifier models by combining deep learning and machine learning algorithms and then subjected the models to statistical testing [4]. According to the experimental findings, the DenseNet201 + Logistic Regression model achieved an impressive accuracy of 95.07%. In contrast to other methods, Karaci utilized the YOLOv3 object detection model to detect the head region of shoulder implants and then fed these regions as inputs to various CNN architectures [12]. As a result, focusing on the head region of the implant using the YOLOv3 object detection model improved the classification accuracy. By combining YOLOv3 with the DenseNet201 model, they achieved an accuracy of 84.76%. However, it's worth noting that using the YOLOv3 object detection model may introduce additional computational complexity and require more resources than other methods. These studies collectively highlight the effectiveness and versatility of deep learning methods, especially CNN architectures, for the detection and classification of shoulder implants from X-ray images. The advancements made in this area hold great promise for enhancing medical imaging and facilitating implant-related decision-making in clinical settings.

Convolutional neural networks (CNNs) have demonstrated significant success in various medical image analysis tasks, including the classification of shoulder implants, thanks to their ability to learn complex representations from data. However, the limited local receptive field in the convolution operation restricts the capture of long-range pixel dependencies [13]. To overcome this limitation, transformer architectures, inspired by their remarkable achievements in natural language processing [14], have been integrated into CNN architectures to encode long-range dependencies and learn more efficient feature representations [15]. The vision transformer (ViT) model proposed by Dosovitskiy et al. marked the first application of

transformer-based architectures to images, formulating the image classification task as predicting a sequence of image patches [16]. Following this pioneering work, ViT-based approaches [17,18] have been proposed and demonstrated state-of-the-art performance across various datasets [19-22].

In this study, the use of vision transformer models, which have recently become a popular area in deep learning architectures, is proposed for effective shoulder implant classification. Most of the studies in the literature are based on classical machine learning and CNN-based approaches. However, adapting transformer models for images has been shown to yield more effective results than CNNs. Due to their high accuracy and often superior performance compared to CNNs, many new studies have started incorporating vision transformer models. This research investigates the success of transformer models in shoulder implant classification and provides detailed comparisons with other CNN-based methods. To ensure objectivity and comparability with other approaches, a publicly available dataset is used. The experimental results show that vision transformers offer highly successful performance and generalization ability.

The contributions of this work can be summarized as follows:

- We present a pioneering approach for shoulder implant classification utilizing ViTs, showcasing the use of this emerging technology in the medical imaging domain.
- Through the fine-tuning of pre-trained ViT models, we achieve enhanced performance compared to traditional CNN-based models such as ResNet-50, Inceptionv3, and MobileNetv3. Despite challenges such as variable image resolution and class imbalance in a small dataset, the ViT-based approach outperforms individual CNN models.
- We achieve results that are competitive with the latest studies in the current literature. This underlines the significance of the proposed ViT-based approach in keeping pace with, and potentially surpassing, the state-of-the-art in shoulder implant classification from X-ray images.

The remaining sections of the paper are as follows: [Section 2](#) provides a detailed explanation of the vision transformer structures, the publicly available shoulder implant dataset, and evaluation metrics. [Section 3](#) presents the experimental results and discussion. Finally, [Section 4](#) offers recommendations and conclusions.

2. Material and methods

All experiments were conducted on a computer equipped with an Intel(R) Core(TM) i9-11900K 3.50 GHz CPU and an NVIDIA GeForce RTX 3080 12GB GPU. Python programming language and PyTorch deep learning framework have been used for implementing the proposed vision transformer-based and CNN-based models in this study.

2.1 Dataset

In this study, a publicly available dataset consisting of 597 X-ray images of shoulder implants [7] was utilized. The dataset was selected due to its currency, having been introduced in 2020 and widely adopted in recent literature. The dataset encompasses X-ray images from four distinct shoulder implant manufacturers: 83 images from Cofield,

294 from Depuy, 71 from Tornier, and 149 from Zimmer. Sample X-ray images representing the four classes in the dataset can be found in [Figure 1](#). The dataset poses several challenges, including variable and relatively low image resolution. Additionally, there are variations in image contrast and an imbalanced distribution of samples among the classes.

For a fair comparison, we used the same setting as in the state-of-the-art study by Sivari et al. [4], where the dataset was divided into two subsets: 90% for training and 10% for testing. Furthermore, for 10-fold cross-validation, the training set was further partitioned into ten groups, with nine sets used for training and one set for validation in each fold. During the dataset split, random images were selected from each class. Additionally, measures were taken during each cross-validation fold to prevent scenarios where all selected validation samples belonged to a single class or where certain classes had no representative samples.



Figure 1. Some sample images from different manufacturers in the dataset (a) Cofield (b) Depuy (c) Tornier (d) Zimmer

2.2 Vision transformer (ViT) model and its variants

In recent years, Transformers, introduced by Vaswani et al. [14], have emerged as highly successful deep learning architectures in Natural language processing (NLP) tasks. The superior performance of Transformers in NLP has motivated researchers to adapt them for computer vision tasks. The vision transformer (ViT), proposed in 2020 [16], has garnered significant attention for its promising results in computer vision tasks.

The ViT architecture adopts an attention mechanism that weights the importance of each part of the input image differently, in contrast to the traditional convolutional layers used in CNNs. The general architecture of the vision transformer model is shown in [Figure 2](#).

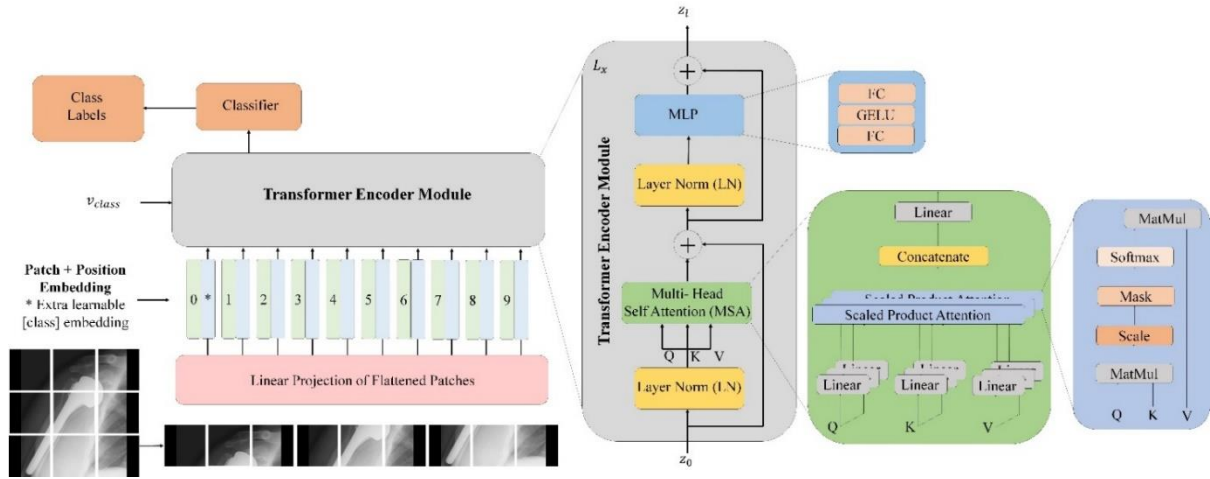


Figure 2. The general architecture of the Vision Transformer (ViT) model

In the ViT model, the input image, represented by $x \in R^{H \times W \times C}$, is transformed into a smaller array of image patches. Each reshaped image patch, denoted as p , is mapped to the z_0 vector using a learned embedding matrix E with Equation (1).

$$z_0 = [x_{class}; x_p^1 E; x_p^2 E; \dots; x_p^N E] + E_{pos} \quad (1)$$

where $E \in R^{(P^2 \times C) \times D}$, $E_{pos} \in R^{(N+1) \times D}$ and $x_p \in R^{N \times (P^2 \times C)}$. N represents the number of extracted image patches and C indicates the number of channels. The x_{class} represents the signal added to the image patches and is used for classification purposes.

The transformer encoder module consists of identical layers denoted by L_x . Each layer is composed of multi-head self-attention (MSA), multi-layer perceptron (MLP), and layer normalization (LN) along with residual connections. To achieve the output map z_l of the same length as the input z_0 , the following steps are applied with Equation (2-3).

$$z'_l = MSA(LN(z_{l-1})) + z_{l-1} \quad (2)$$

$$z_l = MLP(LN(z'_l)) + z'_l \quad (3)$$

where $l = 1 \dots L$ represents each ViT encoder layer, and the output of each layer is fed as input to the next layer. The final MLP layer is placed on the output of the L identical encoder layers, and along with the softmax classifier, it is used for classifying the learned image representations.

The self-attention mechanism is employed to predict the relationship between elements in the input. In essence, an attention layer combines the total information from all input elements to update each component in the sequence. The interaction obtained from the inputs is transformed by three learnable weight matrices, query (W^Q), key (W^K), and value (W^V) matrices. For a given input array X , the input is first projected into these weight matrices as follows: $Q = XW^Q$, $K = XW^K$, and $V = XW^V$. The output of the self-attention layer is calculated with Equation (4).

$$Self - attention(Q, K, V) = softmax\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right) \quad (4)$$

where d_k is a scaling factor and the result of self-attention is combined with the input using the softmax function.

In the realm of ViT models, two noteworthy advancements have emerged, namely, the data-efficient image transformer (DeiT) and the Swin Transformer. These innovations address crucial challenges in large-scale training datasets and processing efficiency for ViT models.

2.2.1 Data-efficient image transformer

DeiT [17] addresses the need for large-scale training datasets in ViT by incorporating an additional distillation token in its input, enabling it to achieve success with fewer data. This model interacts with class and patch tokens through self-attention layers and undergoes learning through backpropagation with the distillation token. The distillation token employs a teacher-student formulation within a knowledge distillation framework.

2.2.2 Swin transformer

Swin transformer [18] introduces a novel hierarchical design that divides the input image into non-overlapping "windows" to efficiently process large-scale images. Unlike traditional image transformers that operate on fixed-size patches, Swin Transformer adopts a "shifted window" mechanism, aiming to capture overlapping information between adjacent windows. Swin Transformer's key feature is its self-attention and shifted window mechanisms, which allow large images to be processed in parallel. The hierarchical self-attention mechanism provides better feature representation by capturing both local and global dependencies. The sliding window mechanism allows the network to be less sensitive to the order of the input sequence, thus contributing to the robustness and generalization of the model.

2.3 Evaluation metrics

We used accuracy (ACC), precision (PRE), recall (REC), and f-measure (FM) to evaluate the performance of the proposed shoulder implant classification models [23]. ACC is calculated as the ratio of correctly predicted instances to

the total number of instances in the test set and indicates the overall accuracy of the classifier. PRE is the ratio of correct positive predictions to the total number of positive predictions made by the classifier. REC measures the ability of the classifier to correctly identify positive examples. The FM is the harmonic mean of precision and recall and provides a more balanced assessment of the classifier's performance. These metrics are calculated as given in Equation (5).

$$\begin{aligned}
 ACC &= \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \\
 PRE &= \frac{TP}{TP + FP} \\
 REC &= \frac{TP}{TP + FN} \\
 FM &= \frac{2 \times PRE \times REC}{PRE + REC}
 \end{aligned} \tag{5}$$

We also used a confusion matrix to illustrate the relationship between actual class values and the class values predicted by the classifier. $k \times k$ confusion matrix was created for the k -class classification problem. The $[i; j]$ cells of the confusion matrix ($i = 1, \dots, k; j = 1, \dots, k$) indicate the frequencies of observations related to the actual class C_i and the predicted class C_j . Table 1 shows an example confusion matrix representation for a 3-class problem.

Table 1. A confusion matrix representation for the multi-class problem

		Predicted Class		
		C_1	C_2	C_3
Actual Class	C_1	a	b	c
	C_2	d	e	f
	C_3	g	h	i

3. Results and discussion

In this section, the performance of the proposed ViT-based models designed for shoulder implant classification is meticulously compared with the latest CNN-based models. To ensure optimal accuracy during the training of all networks, a transfer learning strategy is employed, significantly reducing both time and data resource requirements. Throughout the learning process, the AdamW optimizer was used with a learning rate of $1e-5$ and a weight-decay regularization value of $1e-8$. The cross-entropy loss function is employed as the designated error function for optimal model learning. Uniform parameters are maintained across all models to ensure a fair and comparable assessment of both ViT-based and CNN-based models in their classification performance for shoulder implants. The batch size for each model is set at 4, and the learning process epoch number is set to 60.

The results presented in Table 2 provide a detailed overview of the classification outcomes achieved by each variant of the ViT-based models and three prominent CNN-based models, showcasing the superior performance of ViT

models in the context of shoulder implant classification. Notably, the Swin Transformer model versions, ranging from Tiny (T), Small (S), Base (B), and Large (L), exhibit the highest classification accuracies among all models considered. Specifically, the Swin-B model stands out with an impressive accuracy of 93.84%. This accuracy is accompanied by a precision value of 88.15% and a recall value of 85.52%, underscoring the robustness and reliability of the Swin-B model in correctly classifying shoulder implants. Comparatively, the results obtained with all ViT models surpass those achieved by three well-established CNN-based models, namely ResNet50 [24], Inceptionv3 [25], and MobileNetv3 [26].

Table 2. Performance comparison of the proposed ViT-based models with CNN-based models

Model	ACC	PRE	REC	FM
ResNet-50	72.30	-	-	-
Inceptionv3	87.69	73.36	71.46	71.09
MobileNetv3	78.46	53.09	52.06	52.32
ViT-T	82.3	64.21	65.81	63.15
DeiT-T	86.15	70.13	63.64	64.31
Swin-T	90.76	80.33	77.84	77.76
ViT-S	87.69	74.67	68.59	69.49
DeiT-S	89.23	74.65	73.02	70.71
Swin-S	91.53	86.38	76.38	77.90
ViT-B	93.07	83.6	85.52	84.39
DeiT-B	91.53	82.99	77.44	78.69
Swin-B	93.84	88.15	85.52	85.93
ViT-L	91.53	85.61	79.89	81.5
DeiT-L	93.84	86.60	86.95	85.36
Swin-L	93.84	87.36	83.69	83.94

While the highest accuracy attained by the Inceptionv3 model is 87.69%, the Swin-B model significantly outperforms it with a remarkable accuracy of 93.84%. This observation underscores the substantial advancements offered by vision-transformer models in the domain of shoulder implant classification. To validate the accuracy and loss variations during the training of the Swin-B model for 60 epochs, we present the Figure 3.

In Figure 3(a), both training and validation accuracies demonstrate swift convergence towards 100%, indicating robust learning. Correspondingly, in Figure 3(b), the loss values converge rapidly towards 0, underscoring the effective optimization of the model.

These results affirm the potential contributions of vision-transformer models, highlighting their capacity to significantly enhance the accuracy and efficiency of shoulder implant classification. Furthermore, the results reinforce the role of ViT models in advancing the applications of medical image analysis, suggesting a promising avenue for further improvements.

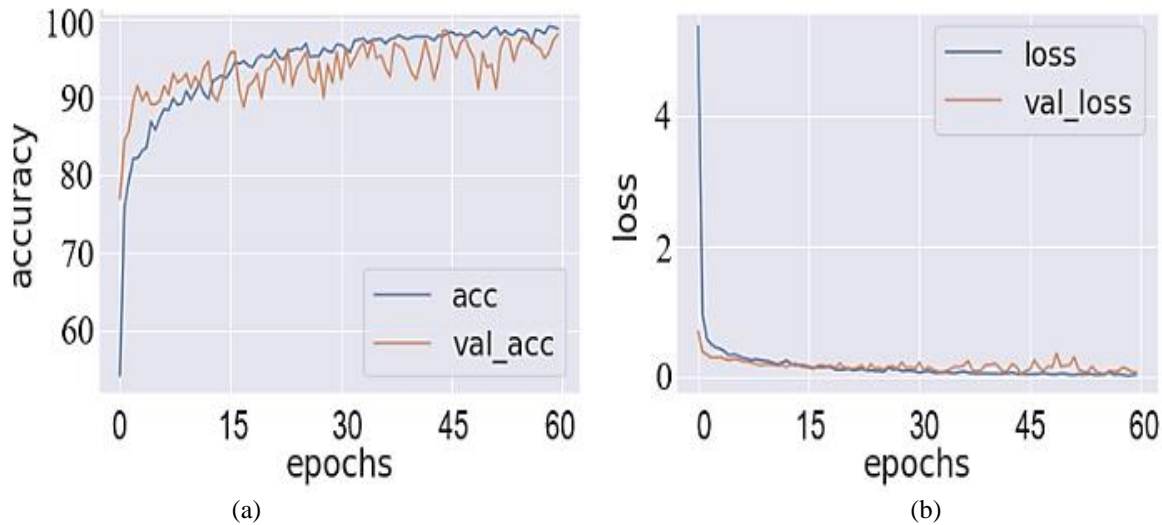


Figure 3. The accuracy and loss variation obtained during the training of the Swin-B model for 60 epochs.

Table 3 also presents a comprehensive comparison of our proposed model for detecting and classifying shoulder implant manufacturers with previous studies conducted on the same dataset [4,7,9-12]. Noteworthy, prior studies have put forth diverse methodologies, encompassing individual machine learning, individual deep learning approaches, and hybrid strategies, showcasing the evolution of techniques in the field. A critical observation from this comprehensive review is that recent studies, leveraging both deep learning and machine learning approaches, consistently yield accurate and reliable classification results.

Urban et al. [7] proposed CNN-based NasNet architecture and achieved a classification accuracy of only 80%, which appears to be relatively low. However, the authors attributed this to the variable and relatively low image resolution, as well as the class imbalance issues present in the dataset. Subsequently, it was observed that the other proposed CNN-based models [4,9,12] were more resilient to these challenges. In particular, the highest cross-validation accuracy, reaching an impressive 97.2%, was reported in a recent study [9]. It's important to note that the study conducted by Sivari et al. [4] achieved the second-highest result at 95.07%, but it's essential to highlight that the dataset in the leading study [9] wasn't divided into test and validation sets. Instead, only 5-fold cross-validation results were provided, raising considerations about the robustness of the evaluation methodology. Addressing this concern, Sivari et al. [4] emphasized the importance of a separate validation dataset to fine-tune model hyperparameters and assess its generalization capabilities. This aligns with best practices in model evaluation.

In our proposed method, we adhere to these principles, employing a comprehensive test set for unbiased result evaluation, and as a result, we achieved a remarkable 93.84% accuracy. It is also noted that the ViT-based methods proposed in this study are more robust than CNN models against datasets containing the aforementioned challenges.

Table 3. Comparison with other studies on the same dataset

Study	Method	ACC
Urban et al. [7]	NasNet	80.0
Sultan et al. [10]	DRE-Net	85.92
Yilmaz [9]	Multi-channel CNN	97.2
Efeoglu et al. [11]	K-NN	74.0
Karaci [12]	YOLOv3 + DenseNet201	84.76
Sivari et al. [4]	DenseNet201 + LR	95.07
This study	Swin-B	93.84

In the study, confusion matrices were obtained to generate a summary by comparing the predicted class labels by the classification model with the actual class labels. Figure 4 displays the confusion matrices obtained sequentially for the tiny, small, base, and large models. It is observed that as the model complexity increases, the number of correctly identified examples (TP) also increases. For instance, in the ViT model, the number of TP was 42 in the tiny version, while it increased to 54 in the large version. On the other hand, for the Swin model, the TP count was 53 in the tiny version, and it rise to 57 in the large version. The Swin model was found to provide the highest results due to its multi-scale processing capabilities, which enabled more comprehensive feature extraction compared to other models. This is due to Swin model's unique self-attention mechanism and architectural design and its ability to effectively capture long-range dependencies in image data. Therefore, the proposed model is thought to help expert pathologists who will make the final decision on patients. Comparing the outcomes of our proposed approach with other machine learning and deep learning studies in the literature, we observe that our results are not only comparable but also highly successful. Moreover, they signify a promising foundation for further improvements in the field. The adaptability and potential for enhancements make our proposed methodology a valuable addition to the existing body of knowledge in the realm of shoulder implant classification.

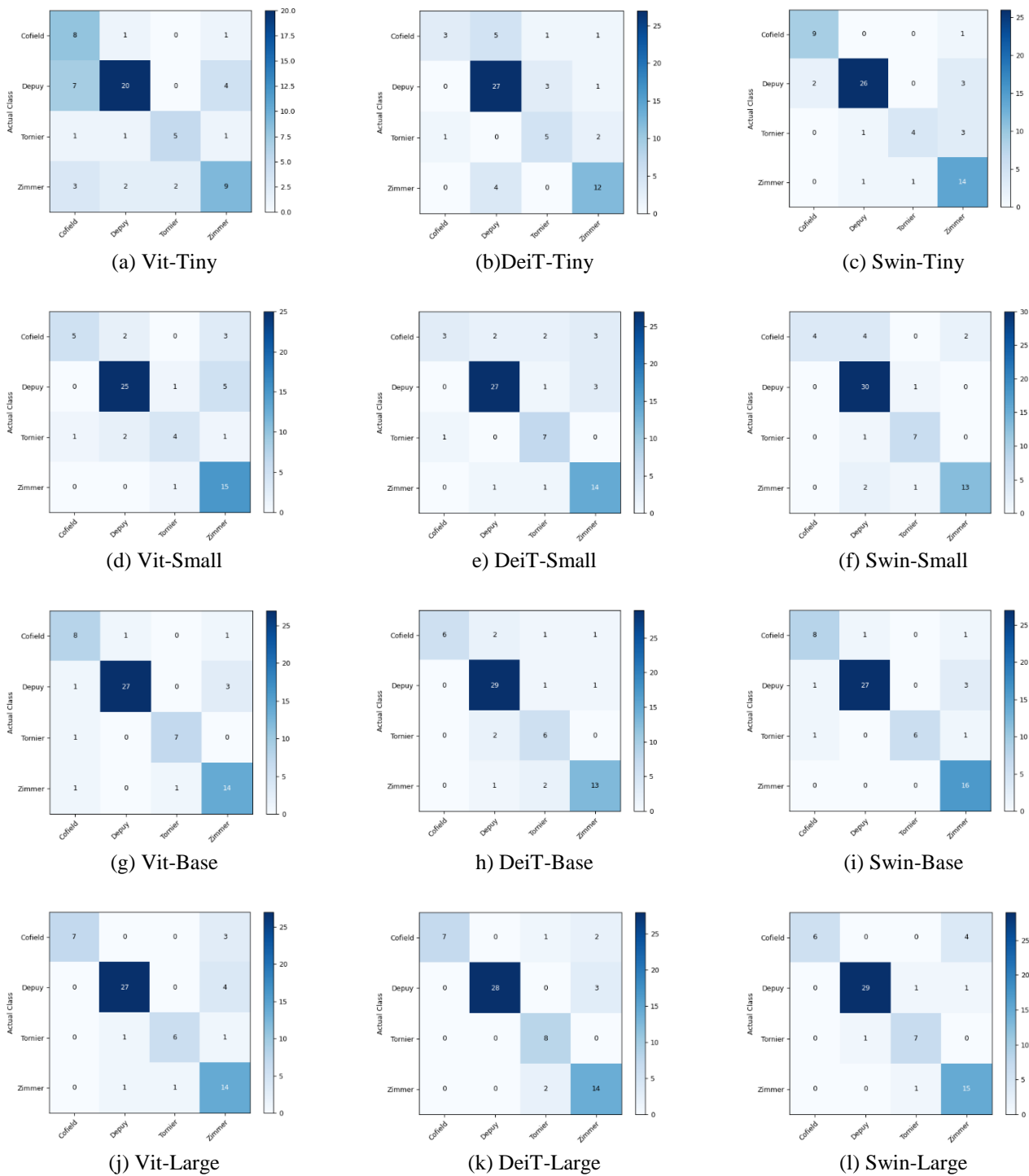


Figure 4. Confusion matrices of the ViT models (ViT: first column, DeiT: second column, and Swin: third column) obtained sequentially for the Tiny, Small, Base, and Large versions on 4-class shoulder implant dataset

4. Conclusions

Vision transformer (ViT) models adapt the Transformer architecture, originally designed for large-scale text processing, to the field of image processing. These models tend to outperform conventional approaches in image processing tasks, particularly when faced with large datasets

and complex structures. A notable advantage of ViT models is their ability to address object relationships in a broader context, making them ideal for tasks requiring long-range dependencies to be addressed. Additionally, when pre-trained on large-scale training datasets, ViT models exhibit significant improvements in feature transfer and generalization capabilities. In this paper, we present a novel

approach using ViT for shoulder implant classification from X-ray images. The proposed approach has shown promising results in automating this process by enabling efficient and accurate identification of shoulder implant manufacturers and models. By fine-tuning pre-trained ViT models, we achieved superior performance than CNN-based individual models on a small dataset despite challenges such as variable image resolution and class imbalance within a small dataset. This automated approach will reduce the reliance on expert opinion and our approach will save valuable time and effort, enabling faster and more accurate decision making. However, it is worth noting that while the results are encouraging, the precision and recall values are still areas for improvement. Therefore, future research directions could include studying larger datasets and proposing new Vision Transformer-based architectures, aiming to further improve the precision and recall of the system.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 20%

References

- [1] R. H. Cofield, Total shoulder arthroplasty with the Neer prosthesis. *JBJS*, 66(6), 899-906, 1984. <https://doi.org/10.2106/00004623-198466060-00010>
- [2] J. Sanchez-Sotelo, Total shoulder arthroplasty. *The open orthopaedics journal*, 5, 106, 2011. <https://doi.org/10.2174/1874325001105010106>
- [3] C. Sukjamsri, The effect of implant misalignment on shoulder replacement outcomes (Doctoral dissertation, Imperial College London), 2015. <https://doi.org/10.25560/28581>
- [4] E. Sivari, M. S. Güzel, E. Bostanci and A. Mishra, A Novel Hybrid Machine Learning Based System to Classify Shoulder Implant Manufacturers. In *Healthcare* (Vol. 10, No. 3, p. 580), MDPI, 2022. <https://doi.org/10.3390/healthcare10030580>
- [5] D. P. Sahoo, M. Rout, P. K. Mallick and S. R. Samanta, Comparative Analysis of Medical Images using Transfer Learning Based Deep Learning Models. In *2022 International Conference on Advancements in Smart, Secure and Intelligent Computing (ASSIC)* (pp. 1-8), IEEE, 2022. <https://doi.org/10.1109/ASSIC55218.2022.10088373>
- [6] B. Sistaninejhad, H. Rasi and P. Nayeri, A Review Paper about Deep Learning for Medical Image Analysis. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/7091301>
- [7] G. Urban, S. Porhemmat, M. Stark, B. Feeley, K. Okada and P. Baldi, Classifying shoulder implants in X-ray images using deep learning. *Computational and structural biotechnology journal*, 18, 967-972, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2020.04.005>
- [8] P. H. Yi, T. K. Kim, J. Wei, X. Li, G. D. Hager, H. I. Sair and J. Fritz, Automated detection and classification of shoulder arthroplasty models using deep learning. *Skeletal radiology*, 49, 1623-1632, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00256-020-03463-3>
- [9] A. Yılmaz, Shoulder implant manufacturer detection by using deep learning: Proposed channel selection layer. *Coatings*, 11(3), 346, 2021. <https://doi.org/10.3390/coatings11030346>
- [10] H. Sultan, M. Owais, C. Park, T. Mahmood, A. Haider and K.R. Park, Artificial intelligence-based recognition of different types of shoulder implants in X-ray scans based on dense residual ensemble-network for personalized medicine. *J. Pers. Med*, 11, 482, 2021. <https://doi.org/10.3390/jpm11060482>
- [11] E. Efeoğlu and T. U. N. A. Gürkan, Radyografi Görüntüleri Ve Sınıflandırma Algoritmaları Kullanılarak Omuz Protezlerinin Üreticilerinin Belirlenmesi. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1), 57-73, 2021. <https://doi.org/10.34186/klujes.906660>
- [12] A. Karaci, Detection and classification of shoulder implants from X-ray images: YOLO and pretrained convolution neural network based approach. *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ*, 37, 283-294, 2022. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.888202>
- [13] F. Shamshad, S. Khan, S. W. Zamir, M. H. Khan, M. Hayat, F. S. Khan and H. Fu, Transformers in medical imaging: A survey. *Medical Image Analysis*, 102802, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.media.2023.102802>
- [14] A. Vaswani, P. Ramachandran, A. Srinivas, N. Parmar, B. Hechtman and J. Shlens, Scaling local self-attention for parameter efficient visual backbones. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 12894-12904), 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.12731>
- [15] J. Devlin, M. W. Chang, K. Lee and K. Toutanova, Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding, *arXiv preprint arXiv:1810.04805*, 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1810.04805>
- [16] A. Dosovitskiy, L. Beyer, A. Kolesnikov, D. Weissenborn, X. Zhai, T. Unterthiner and N. Houlsby, An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale. *arXiv preprint arXiv:2010.11929*, 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.11929>
- [17] H. Touvron, M. Cord, M. Douze, F. Massa, A. Sablayrolles and H. Jégou, Training data-efficient image transformers & distillation through attention. In *International conference on machine learning* (pp. 10347-10357), PMLR, 2021.
- [18] Z. Liu, Y. Lin, Y. Cao, H. Hu, Y. Wei, Z. Zhang and B. Guo, Swin transformer: Hierarchical vision transformer using shifted windows. In *Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision* (pp. 10012-10022), 2021.
- [19] S. Tummala, J. Kim and S. Kadry, BreaST-Net: Multi-class classification of breast cancer from histopathological images using ensemble of swin

- transformers. *Mathematics*, 10(21), 4109, 2022. <https://doi.org/10.3390/math10214109>
- [20] S. Ayas, Multiclass skin lesion classification in dermoscopic images using swin transformer model. *Neural Computing and Applications*, 35(9), 6713-6722, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00521-022-08053-z>
- [21] A. Alotaibi, T. Alafifi, F. Alkhalawi, Y. Alatawi, H. Althobaiti, A. Alrefaei and T. Nguyen, ViT-DeiT: An Ensemble Model for Breast Cancer Histopathological Images Classification. In *2023 1st International Conference on Advanced Innovations in Smart Cities (ICAISC)* (pp. 1-6). IEEE, 2023. <https://doi.org/10.1109/ICAISC56366.2023.10085467>
- [22] S. Regmi, A. Subedi, U. Bagci and D. Jha, Vision Transformer for Efficient Chest X-ray and Gastrointestinal Image Classification. arXiv preprint arXiv:2304.11529, 2023.
- [23] D. M. Powers, Evaluation: from precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness and correlation. arXiv preprint arXiv:2010.16061, 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.16061>
- [24] K. He, X. Zhang, S. Ren and J. Sun, Deep residual learning for image recognition. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 770-778), 2016. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1512.03385>
- [25] C. Szegedy, V. Vanhoucke, S. Ioffe, J. Shlens and Z. Wojna, Rethinking the inception architecture for computer vision. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 2818-2826), 2016. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1512.00567>
- [26] A. Howard, M. Sandler, G. Chu, L. C. Chen, B. Chen, M. Tan and H. Adam, Searching for mobilenetv3. In *Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision* (pp. 1314-1324), 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.02244>





Bor nitrür kuantum nokta-grafen hidrojel kompozitinin süper kapasitör uygulaması

Supercapacitor application of boron nitride quantum dot-graphene hydrogel composite

Buse Sert¹ , Ersan Harputlu^{2,*} 

¹Tarsus Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 33400, Tarsus, Türkiye

²Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Temel Bilimleri Bölümü, 33400, Tarsus, Türkiye

Öz

Bu çalışmada süperkapasitörler için kullanılacak yeni bir elektrot malzemesi olan bor nitrür kuantum nokta (BNKN) / indirgenmiş grafen oksit (rGO) hibrit yapısının sentezini ve elektrokimyasal uygulamalarına yer verilmiştir. BNKN'nin, grafen oksit (GO) ile aynı kristal yapıya sahip olması ve bunun sonucunda BNKN@rGO hibrit yapısının çok iyi elektriksel özellik gösteriyor olması tercih edilme sebeplerindedir. Hekzagonal bor nitrür (h-BN) nano yapı tabanlı hibrit malzeme olan BNKN, termal kararlılıkları ve elektriksel iletkenlikleri sebepleriyle son yıllardaki çalışmalarda karşımıza çıkarken, grafen ise geniş spesifik yüzey alanına sahip olduğu için süperkapasitör çalışmalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Ayrıca, grafenin kapasitans değerini geliştirmek için bu yapıya farklı nanomalzemeler eklenmesinin ana sebebi karbon malzemelerin elektron verici özelliklerinin geliştirilmesidir. Bundan dolayı, süperkapasitörlerde kullanılacak BNKN@rGO hibrit elektrotunun elektrokimyasal aktiviteyi arttıracığı düşünülerek spesifik kapasitans değeri ölçülmüştür. Elektrokimyasal çalışmalar sonucunda, BNKN@rGO hibrit yapısının 5 mvs-1 tarama hızında 207.5 F/g yüksek kapasitans değeri elde edilmiştir. Ayrıca 1.000 döngüde %88.9'luk döngüsel stabilite performansı sergilemiştir.

Anahtar kelimeler: Süperkapasitör, Bor nitrür kuantum nokta, Hibrit yapı, Grafen hidrojel şablonu

1 Giriş

Artan küresel enerji talebi ile birlikte, sürdürülebilir alternatif enerji depolama sistemlerine olan ilgi artmaktadır. Süperkapasitörler (SC'ler), karakteristik hızlı şarj/deşarj (CD) süreçleri, yüksek güç yoğunluğu, yüksek performansları, döngü kararlılıkları ve uzun ömürleri nedeniyle gelecek vaat eden enerji depolama cihazlarıdır [1-2]. Aktif karbon, karbon nanotüp, karbon nanofiber ve grafen gibi çeşitli morfolojilere sahip karbon bazlı malzemeler süperkapasitör uygulamalarında elektrot malzemeleri olarak sıklıkla karşımıza çıkmaktadır [3-5]. Ching-Fang Liu ve diğerleri [6] yüksek enerji yoğunluğuna sahip süperkapasitörler üzerine yapılan araştırmalar ile sürekli artan enerji talepleri ve elektrikli araçların hızla gelişmesi

Abstract

In this study, the synthesis and electrochemical application of boron nitride quantum dot (BNKN) / reduced graphene oxide (rGO) hybrid structure, which is a new electrode material to be used for supercapacitors, is investigated. BNKN is recommended because it has the same crystal structure as graphene oxide (GO), and so the hybrid structure of BNKN@rGO exhibits excellent electrical characteristics. BNKN, a hexagonal boron nitride (h-BN) nanostructure-based hybrid material, has appeared in recent studies due to its thermal stability and electrical conductivity, while graphene is frequently preferred in supercapacitor studies because it has a large specific surface area. In addition, the main reason for adding different heterostructures to this structure to improve the capacitance value of graphene is; changing the electron donating properties of carbon materials has been made a priority. Therefore, the specific capacitance value was measured, considering that the BNKN@rGO hybrid electrode to be used in supercapacitors would increase the electrochemical activity. A high capacitance value of 207.5 F/g was found at 5 mvs-1 scanning speed of the BNKN@rGO hybrid structure as a result of electrochemical investigations. At 10,000 cycles, it also demonstrated a cyclic stability performance of 88.9%.

Keywords: Supercapacitor, Boron nitride quantum dots, Hybrid structure, Graphene hydrogel

nedeniyle karbon bazlı malzemeler üzerine çalışmalarını geliştirmişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda, karbon bazlı malzemelerin çalışan hücre voltajını ve hibrit sistemlerin modifikasyonunu geliştirerek yüksek hücre voltajlı SC'ler için potansiyel stratejilere işaret ettiğini de eklemişlerdir. Yu Bin Tan ve Jong-Min Lee [7] yaptıkları çalışmada, karbon bazlı malzemelerden olan grafenin, üstün elektriksel iletkenlik ve mekanik özellikler gibi olağanüstü özelliklerin yanı sıra karbon nanotüplerden (CNT'ler) daha iyi geniş bir yüzey alanı sağladığını rapor etmişlerdir. Ek olarak grafenin yüzey alanı gözenek boyutu dağılımına göre değişmediğinden süperkapasitör uygulamaları için potansiyel kullanım alanlarından biri haline gelmektedir.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ersanharputlu@tarsus.edu.tr (E. Harputlu)
Geliş / Received: 11.01.2024 Kabul / Accepted: 14.03.2024 Yayınlanma / Published: 15.04.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1418010

Grafenin süperkapasitör uygulamalarında, kapasitans değerini geliştirmek için ise, çeşitli heteroatomların (N, S, P, B vb.) bu yapıya dahil edilmesiyle karbon malzemelerin elektron verici özelliklerini değiştirmek son zamanlarda popüler çalışmalar arasındadır [8-10]. Yanhong Lu ve arkadaşları [11], süperkapasitörlerin performansının büyük ölçüde elektrot malzemelerinin özelliklerine bağlı olduğunu ve kontrol edilebilir morfolojisi, uygun gözenek yapısı gibi avantajları sebebiyle de azot katkılı grafenin (NG) süperkapasitör uygulamaları için yüksek potansiyel sergilediğini raporlamışlardır. Çeşitli heteroatom katkılama yöntemleri arasında, azot, karşılaştırılabilir bir boyutta olduğu ve karbon atomları ile güçlü değerlik bağları oluşturmak için mevcut beş değerlik elektronu içerdiği için potansiyel bir adaydır. Ek olarak, yapılan teorik çalışmalar sonucunda, azot ile katkılanan grafenin elektronik özelliklerini ve kimyasal reaktivitesini özelleştirebileceğini de eklemiştirlerdir. P. Karthika ve diğerleri [12] ise çalışmalarında, fosfor katkılı grafenin sentezini, karakterizasyonunu ve süperkapasitör uygulamaları için kullanımını bildirmektedir. Çalışmanın sonucunda, fosforla işlevselleştirilmiş grafenin, fosfor içermeyen muadillerinden daha yüksek spesifik kapasitans (367 F/g-1) ve daha yüksek bir enerji yoğunluğu (59 Wh/kg-1) gösterdiğini gözlemlemiştirlerdir. Sanjit Saha ve arkadaşları [13] ise yaptıkları çalışmada nano yapıları heksagonal bor nitrid (h-BN)/indirgenmiş grafen oksit (rGO) kompozitini tek aşamalı hidrotermal yöntemle sentezleyerek, süperkapasitör uygulamaları için kullanmışlardır. Oluşturulan hibrit yapıda, süper kafes oluşumu, iki farklı bant aralığına karşılık gelen iki ayrı UV-görünür absorpsiyon pikinin varlığı ile doğrulanmıştır. Yapılan üç elektrotlu elektrokimyasal ölçümde ise hazırlanan hibrit yapı için 4 A g⁻¹'lik bir akım yoğunluğunda, 6M KOH elektrolitinde ~824 F g⁻¹'lik yüksek bir spesifik kapasitans elde edilir. Termal olarak indirgenmiş grafen oksitinin negatif elektrot olarak ve h-BN/rGO kompozitinin pozitif elektrot olarak kullanıldığı asimetrik süper kapasitör (ASC) çalışması başarıyla tamamlanmıştır. Yüksek termal iletkenlikleri, mekanik mukavemetleri, optik şeffaflıkları, esneklikleri ve termal kararlılıkları nedeniyle h-BN nanoyapı tabanlı hibrit malzemeler dikkat çekmektedir [14-15]. Bor nitridi oluşturan elementlerden, bor (B) ve azot (N), karbon (C) ile aynı hizada olduklarından dolayı birbirlerine benzer yapıya sahiptirler. Bundan dolayı h-BN, grafene benzer bir kristal yapıya sahiptir [16]. Ayrıca, h-BN ve grafenin heteroyapısı, ayarlanabilir bir bant aralığı ve yüksek yük taşıyıcı yoğunluğu gibi, ilgi çekici ve ayarlanabilir elektrokimyasal özelliklere sahip yeni yüksek performanslı elektrot malzemelerinin tasarımı için faydalı avantajlar sağlar [17]. Bu sonuçlar doğrultusunda, h-BN ile grafenin bileşimi benzersiz elektrokimyasal ve fizikokimyasal özelliklerinden dolayı ilgi gören hibrit yapılardan olmuştur. Bu nedenle, h-BN nano tabakalarının büyük oranda birbirinden ayrılmasıyla bor nitrid kuantum noktalar (BNKN) elde edilir [18-19]. BNKN'lerin floresans özellikleri, yüksek termal stabilitesi ve düşük toksisite, iyi dağılılabilirlik ve basit sentez yöntemi gibi özelliklerinden dolayı yeni olan çalışmalarda önemli bir rol oynamaktadır [20-22]. Ayrıca kuantum

noktalar çok küçük nanokristaller olduklarından, hibrit malzemenin de BNKN boyutunda olması durumunda optik, elektronik ve termoelektrik özelliklerde daha iyi performans göstermesi beklenmektedir [23-24].

Bu çalışmada, indirgenmiş grafen oksit hidrojel (rGOH) üzerindeki BNKN nanokompoziti ile üretilen BNKN@rGOH hibrit elektrotun elektrokimyasal çalışmaları üzerinde denemeler yapılmıştır. Buradaki amaç ise, süper kapasitör uygulamalarında kullanılacak, yeni ve yüksek kapasitans değerine sahip farklı hibrit yapılar geliştirmektir. BNKN, nano ölçekli boyutu ve fonksiyonel gruplarının da varlığında son derece gelişmiş bir reaktivite ortaya çıkararak, birleştirme reaksiyonu yoluyla rGOH yüzeyi ile başarılı bir kompleks kovalent bağ oluşumu sağlamaktadır. Bu kovalent bağ, BNKN ve rGOH arasındaki ara yüzey bağlama kuvvetini artırarak rGOH yüzeyindeki kusurlu delik yoğunluğunu azaltır. Ayrıca BNKN, önemli ölçüde artan yük taşıyıcı yoğunluğuna yol açan ve değişen yüzey enerjisi nedeniyle hidrofilik bir elektrolit çözeltisi (KOH) ile uyumluluğunu geliştirir. Böylece, elektrolit adsorpsiyonunu ve elektrot malzemelerine sızmasını arttıran p-tipi bir katkı maddesi olarak görev yapmaktadır. BNKN@rGOH elektrotunun çok iyi döngü kararlılığı, iyi kapasitans değeri ile süperkapasitör uygulamalarında elektrot olarak kullanılabilirliği test edilmiştir.

2 Materyal ve metod

2.1 Kullanılan malzemeler

Grafit tozu, sülfirik asit (H₂SO₄, %95.5-96.5), potasyum permanganat (KMnO₄), hidrojen peroksit (H₂O₂) ve hidroklorik asit (HCl) kimyasalları için Sigma Aldrich marka kullanılmıştır. Borik asit (H₃BO₃), askorbik asit (C₆H₈O₆) ve amonyak solüsyonu (NH₄Cl %37) için Merck marka kullanılmıştır.

2.2 Grafen oksit (GO) sentezi

GO, değiştirilmiş bir Hummers ve Offeman yöntemi kullanılarak grafit tozundan hazırlandı [25]. Yüzey alanı artırılmış 1 g grafit tozu ve 200 mL H₂SO₄ oda sıcaklığında bir gün boyunca karışmaya bırakıldı ve devamında bu karışıma buz banyosu içerisinde 10 g KMnO₄ eklendi. Reaksiyon devamında oda sıcaklığından buz banyosuna aktarılan çözeltiye, öncelikle 200 mL deiyonize su ve arkasından çözeltinin rengi açık kahverengiden sarıya dönene kadar yavaşça hidrojen peroksit (H₂O₂) eklendi. Son olarak elde edilen GO parçaları, sırasıyla saf su ve hidroklorik asit (HCl) (9:1) çözeltisi ile santrifüj yapılarak toplandı ve vakumlu etüvde 70 °C'de kurumaya bırakıldı [26].

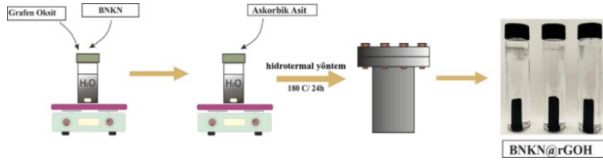
2.3 BNKN sentezi

BNKN sentezinin ilk aşamasında 4 g borik asit 10 mL distile su ve 20 mL etanol çözeltisi içerisinde 1 saat karışmaya bırakıldı. İkinci aşamada, farklı bir beher içerisinde 3 g üre, %25'lik 36 mL amonyak çözeltisi içerisinde çözüldükten sonra, borik asit / distile su / etanol karışımına eklendi, ultrasonik banyo içerisinde 1 saat daha bekletildi. Homojen hale gelen karışım, 24 saat 200 °C'de otoklava aktarıldı. Otoklav sonrası elde edilen sıvıyı

uzaklaştırmak için evapore işlemi yapıldı ve sonrasında santrifüjle malzeme toplanarak etüvde 70 °C'de kurumaya bırakıldı [27]. Hazırlanan BNKN malzemesinin XRD, UV, TEM ve SEM analizleri ile doğruluğu ispatlanmıştır.

2.4 BNKN@rGOH nanokompozit yapısından hidrojel hazırlanması

BNKN@rGOH hibrit yapısının oluşumu için; 30 mg GO, 15 mL distile su içerisinde iyice dağılına kadar ultrasonikasyona tabii tutuldu. Daha sonra bu GO solüsyonuna 15 mg / 30 mg / 60 mg olmak üzere farklı oranlarda belirlenen BNKN nanokompozit malzemesi eklenerek 1 saat boyunca karışıma devam edildi. Sonraki aşamada, bu karışımlara 60 mg askorbik asit eklenerek karışım 1 saat sonunda sonlandırıldı. Oluşacak hibrit yapının, otoklavda 180 °C'de 24 saat ısıtılması sonucunda Şekil 1'de elde edilen hidrojeller detaylı bir şekilde gösterildi. Ek olarak, SEM ve XRD analizi ile malzemenin doğruluğu ispat edildi.

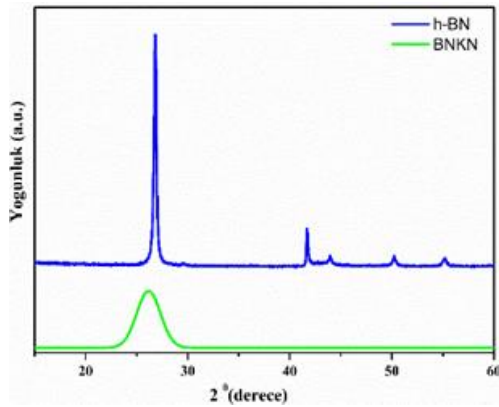


Şekil 1. BNKN@rGO hidrojel oluşumu

3 Bulgular ve tartışma

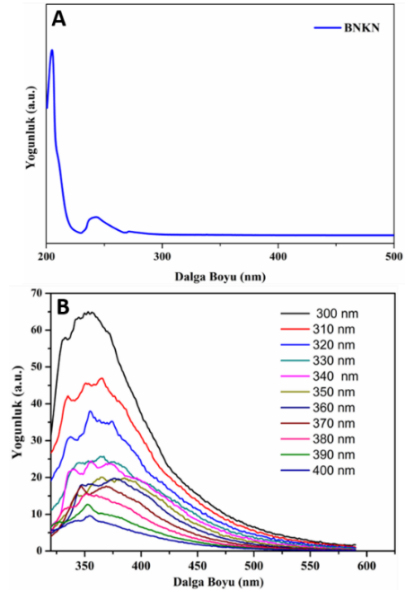
3.1 h-BN, BNKN ve BNKN@rGOH hibrit yapısının karakterizasyon yöntemleri

Şekil 2'de h-BN ve BNKN'nin X-ışını kırınım (XRD) desenleri verilmektedir. h-BN'nin (JCPDS no. 34-0421) kristalografik düzleminden (002) kaynaklanan, güçlü tepe noktasına denk gelen ~26 °C'de oldukça kristalli bir yapıyı ortaya çıkarmaktadır. Modellerdeki daha zayıf zirveler sırasıyla $2\theta = 48,5^\circ, 52^\circ, 55^\circ$ 'deki (100), (101) ve (004) kristalografik düzlemlerinden kaynaklanmaktadır. BNKN'de h-BN'ye göre daha geniş bir pik şiddetlenmesi görülmektedir. Kırınım açısı ve görüntü bakımından her iki malzemede de tepe noktalarının değişmeden kaldığı açıktır. BNKN'lerde görülen bu geniş pik, yapısındaki pul pul dökülmeye atfedilmektedir [27].



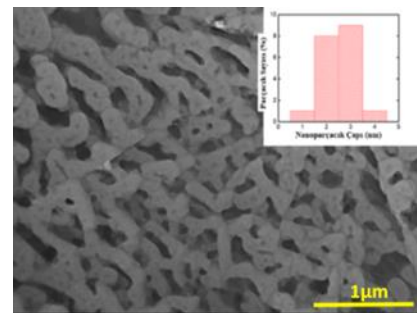
Şekil 2. h-BN ve BNKN XRD şeması [27]

Nanokompozit malzemenin optik özelliklerini incelemek için kullanılan Genesys 150 model UV-Vis spektrumunda, 205 nm'de absorpsiyon zirvesi olduğu görülmektedir. Şekil 3'teki ek görüntülerde ise, BNKN'lerin 365 nm dalga boyunda mavi floresans özellik göstermektedir [28]. Şekil 3B'deki PL uyarma ve emisyon spektrumunda ise, 300-400 nm arasında farklı dalga boylarında analiz alınarak, en fazla floresans emisyon 360 nm dalga boyunda görülmüştür. Böylece, UV spektrumunda mavi görünen BNKN sulu dispersiyonlarının mavi floresans etki sunmaları PL emisyon spektrumunda 365 nm dalga boyunda mavi etki görülmesiyle eşleşmektedir.



Şekil 3. BNKN'nin (A) UV ve (B) PL emisyon grafikleri [27] ve BNKN XRD şeması [27]

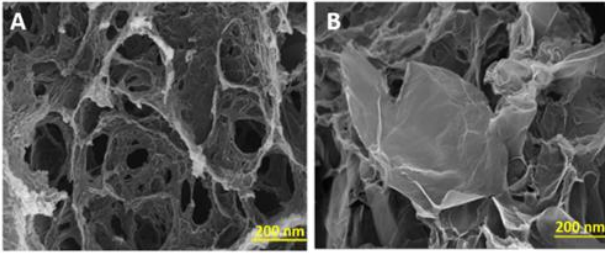
BNKN'ler çok küçük nanokristallerdir. Yüzey morfolojisi hakkındaki detaylı bilgi, 200 kV FEI TALOS F200S marka TEM analizi aracılığı ile tespit edilmiştir. BNKN'lerin Şekil 4'te verilen TEM görüntülerine ek olarak, nanoparçacık çapı Image J programıyla hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonucunda nanoparçacık çapının yaklaşık 2-4 nm arasında olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4. BNKN'lerin TEM görüntüsü ve partikül boyut dağılımı ve BNKN XRD şeması [27]

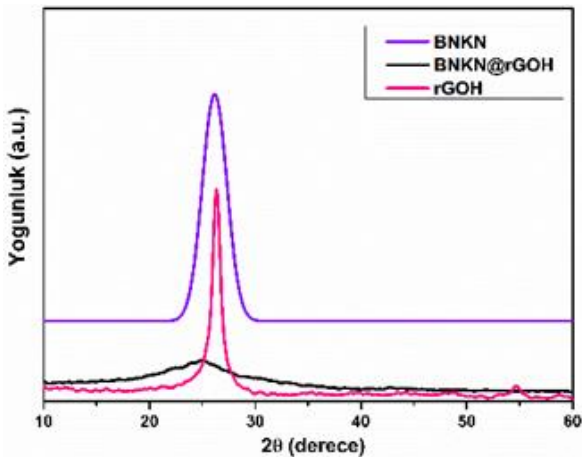
Hidrotermal yöntemle elde edilmiş ve dondurularak kurutulmuş rGOH ve BNKN@rGOH (30 mg/ 30 mg) hibrit

yapısının SEM görüntüleri Şekil 5'te verilmiştir. Sentezlenen örneklerin yüzey morfolojisi ve mikro yapısı hakkında bilgi edinmek için 20 kV FEI QUANTA FEG 650 model SEM cihazı kullanılmıştır. Şekil 5A'da rGOH yüzeyi incelenirken, Şekil 5B'de ise BNKN@rGOH(30 mg/ 30 mg) hibrit yapısının morfolojisi gösterilmektedir. Şekil 5A'da grafen tabakalarının üzerinde pürüzsüz bir yüzey gözlemlenmektedir. Şekil 5B'de hibrit yapının morfolojisinde ise rGOH yapısının yüzeyine BNKN nanoparçacıklarının yapışmasını doğrulayan tabakalar gösterilmektedir. Ayrıca, bu yapıda, borun düzensiz morfolojisi, aglomerasyonu ve değişen boyutları görülmektedir. Her iki malzeme de iyi tanımlanmış ve birbirine bağlı 3B (boyutlu) gözenekli bir ağ gösterildi [29].



Şekil 5. rGOH ve BNKN@rGOH (30 mg/ 30 mg) hibrit yapısının SEM görüntüsü

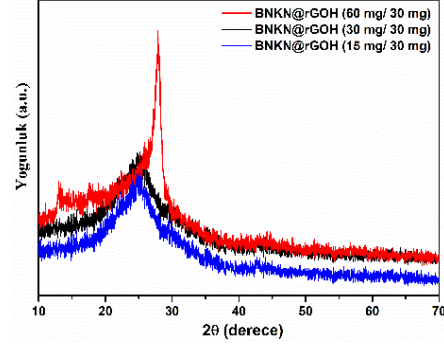
rGOH ve BNKN@rGOH (30 mg/ 30 mg) örneklerinin kristalografik karakterizasyonu ve ara tabaka mesafesi XRD (Rigaku, $\text{CuK}\alpha$ $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$) kullanılarak Şekil 6'da belirlendi. Katkısız rGOH için çıkan güçlü ve yoğun bir pik gözlemlenmiştir. Yapıya BNKN eklendikten sonra ise, yoğunluğun azaldığını ve oksijen içeren GO gruplarının belirli bir yüzde verimli bir şekilde çıkarıldığı görülmüştür. Hidrotermal işlem sonrasında, BNKN@rGOH yapısında görünen geniş pik, bor ile rGOH'ın yapıdan azalmasına yorumlanmaktadır.



Şekil 6. BNKN@rGOH (30 mg/ 30 mg) XRD spektrumları

Farklı oranlarda katılan BNKN@rGOH hibrit yapısının XRD analizlerinin kıyaslaması Şekil 7'de verilmiştir. BNKN@rGOH (60 mg/ 30 mg) hibrit yapısı

diğer katkılama oranındaki hibrit yapılara göre şiddetli bir pik vermiştir. Bunun nedeni ise; hibrit yapı içerisinde BNKN oranının artmasıyla, XRD spektrumlarında görüldüğü gibi kaymalar meydana gelmektedir. BNKN oranı arttıkça pik şiddetinin de artması beklenen bir durumdur.



Şekil 7. Farklı katkılama oranlarına sahip BNKN@rGOH hibrit yapılarına sahip XRD Spektrumları

Tablo 1'de, rGOH ve BNKN@rGOH yapılarının BET yüzey alanı ölçülmüştür. Buna göre, BNKN@rGOH (15 mg/ 30 mg) hibrit yapısının $82.75 \text{ m}^2/\text{g}$ ile en yüksek spesifik yüzey alanına sahip olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 1. rGOH ve BNKN@rGOH ait BET yüzey alanı

Örnek	BET yüzey alanı	Langmuir yüzey alanı	Maksimum gözenek hacmi (p/p^0)	BJH	BJH
				Adsorpsiyon ortalaması	Desorpsiyon ortalaması
				gözenek genişliği (4V/A):	gözenek genişliği (4V/A)
rGO	150.8 657 m^2/g	193.0296 m^2/g	0.58732 8 cm^3/g	227.984 Å	285.432 Å
30mg GO@1 5 mg BNKN	82.75 79 m^2/g	106.5242 m^2/g	$\text{p}/\text{p}^0=0.9$ 8664716 8: 0.20804 8 cm^3/g	115.820 Å	123.864 Å
30 mg GO@3 0 mg BNKN	71.95 48 m^2/g	96.4708 m^2/g	p/p^0 =0.9793 20699: 0.15776 0 cm^3/g	355.681 Å	266.338 Å

3.2 BNKN@rGOH üzerine yapılan elektrokimyasal çalışmalar

Elektrokimyasal ölçümler, üç elektrotlu bir sistemde 100-240 V, 47-63 Hz, 150 VA özelliklere sahip IVIUMSTAT cihazı ile gerçekleştirilmiştir. CV ve EIS testlerinde ve GCD ölçümlerinde, çalışma elektrotu (numune kaplı nikel köpük), platin levha karşı elektrotu ve standart bir referans elektrotu (SCE) içeren üç elektrotlu bir cam hücre kullanıldı. Galvanostatik yük-deşarj (GCD) ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) eğrileri, 6M KOH elektroliti içerisinde ölçülmüştür. EIS verileri, açık devre potansiyelinde 0.01 Hz ila 100 kHz frekans aralığında toplanmıştır. Süperkapasitörler için hazırlanacak farklı

oranlardaki elektrotlar ise yaklaşık olarak %90 aktif malzeme, %10 PVDF malzeme olacak şekilde NMP (N-metil pirlidon) içerisinde dağıtılan kompozitler olarak kullanıma hazırlanmıştır. Çalışma elektrodu olarak temizlenmiş bir Nikel köpük substratı (1 cm x 1 cm) kullanılmış ve yukarıda bahsedilen kompozit bunun üzerine kaplanmıştır. Çalışma elektrodu ~24 saat boyunca 80 °C'de bir vakumlu fırın içinde kurutulmaya bırakılmıştır. Yapılan kaplama sonucunda çalışma elektrotunda (BNKN@rGOH/NF) elde edilen madde miktarı 1 mg olarak tespit edilmiştir. Hazırlanan kompozit malzeme için öncelikli olarak BNKN@rGOH (15 mg/ 30 mg) oranlarında belirlenen malzemenin elektrokimyasal ölçümleri yapılmıştır. Bu çalışmada uygulanacak olan potansiyel aralık ise -0.8 ile 0 V olarak belirlenmiştir. Bu potansiyel aralığın üzerine çıkıldığında (-0.8 V) elde edilen faradaik akım değerinde anlık olarak artış ve düşüş meydana gelerek elektrot yüzeyinde deformasyona neden olmuştur. Bu ölçümlerden gözlemlenen diğer bir durum, başlangıçta artan negatif potansiyelle birlikte hidrojen evriminde beklenen bir artış meydana gelmiştir. Hidrojen reaksiyonu bir noktaya kadar bekleneni takip etmiş daha sonra bir noktada hidrojen evriminin reaksiyon hızı, artan potansiyelle rağmen azalmaya başlamıştır. Yani elektrot belirli bir potansiyelle ulaştığında reaksiyon kinetiği azaldığı tespit edilmiştir. Hazırlanan elektrotların spesifik kapasitans değerini hesaplamak için kullandığımız formül ise aşağıdaki gibidir.

$$C_s = \frac{\int_{v_i}^{v_f} I dv}{mv\Delta v} \quad (1)$$

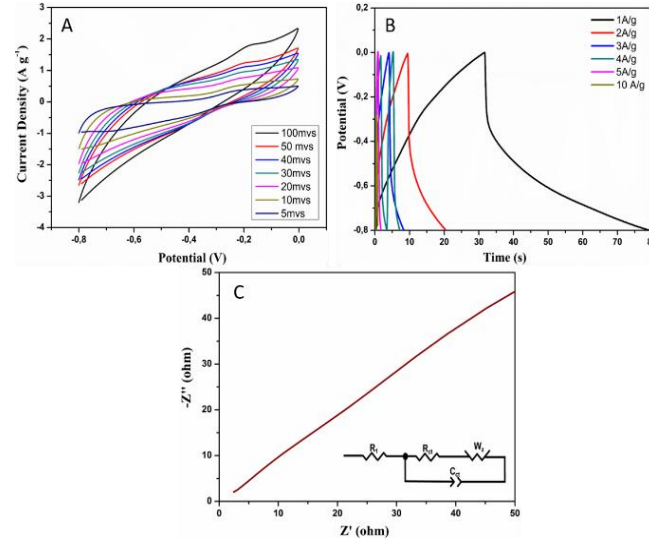
Bu formülde; aktif elektrot malzemesinin toplam ağırlığı (m), uygulanan potansiyel (V), elektrot üzerindeki tarama hızı (v) ve $\int IdV$ ise uygulana potansiyel aralığında elde edilen CV alanıdır.

Tablo 2. Bor katkılı çalışmaların kıyaslanması

Örnekler	Elektrol it	Spesifik Kapasitans	Kapasitans Tutma Eğilimi	Ref
Amin Katkılı Bor Nitrür Kuantum Nokta (A-BNQD)	2 M KOH	256.8 F g ⁻¹	10.000 döngüde, %94.38 kapasitans tutma eğilimi	[1]
Bor katkılı hiyerarşik gözenekli karbon (B-HPC)	1M H ₂ SO ₄	169 F cm ⁻³	10.000 döngüde, %93 kapasitans tutma eğilimi	[2]
Boran doped graphene nanoplates	6 M KOH	200 F g ⁻¹	4.500 döngüde %95 kapasitans tutma eğilimi	[3]
Bor Katkılı Grafen (BG)	6 M KOH	172.5 F g ⁻¹	5.000 döngüde %96.5 kapasitans tutma eğilimi	[4]
BNKN@rGOH (30mg/30mg)	6 M KOH	207 F g ⁻¹	1.000 döngüde %88.9 kapasitans tutma eğilimi	Mevcut çalışma

Farklı BNKN katkı oranlarından elde edilen BNKN@rGOH elektrotlarının spesifik kapasitans değerleri, literatürde çeşitli bor katkılı karbon bazlı malzemeler için bildirilen değerlerle karşılaştırılmıştır (Tablo 2). Mevcut çalışmada, BNKN@rGOH'ın spesifik kapasitans değeri, literatürde bildirilen değerlere göre daha yüksektir. Ancak yapılan bazı çalışmalarda (A-BNQD), BNKN yüzeyi fonksiyonel hale getirilerek daha yüksek kapasitans sonucu elde eden çalışmalarda incelenmiştir. Sunulan elektrokimyasal çalışmalar doğrultusunda, üstün yük depolama davranışı elde etmek için yalnızca malzemenin değil, aynı zamanda malzeme ve elektrolit kombinasyonunun da oldukça önemli olduğu gözlemlenmiştir. Tablo 2'de sunulan kıyaslama, mevcut elektrokimyasal sistemin (BNKN@rGOH ve 6 M KOH) literatürde bildirilen diğer sistemlerle karşılaştırıldığında kesinlikle uygulanabilir olduğunu açıkça göstermektedir.

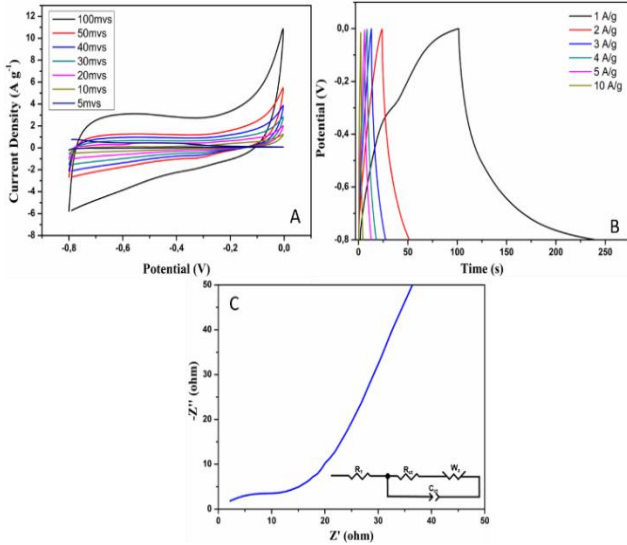
Farklı oranlarda katılan BNKN oranına göre ilk olarak alınan ölçümlerdeki BNKN@rGOH (15 mg/ 30 mg) hibrit yapısında, farklı tarama hızlarında ve farklı akım yoğunluklarında gözlemlenen CV eğrileri Şekil 8A'de verilmiştir. Bu grafiğe göre, hesaplanan en yüksek spesifik kapasitans değeri 5 mvs-1'de 141.25 F/g bulunmuştur. En son 100 mvs-1 de taranan CV eğrisinde çıkan kapasitans değeri ise; 25 F/g olarak hesaplanmıştır. Şekil 8B'de farklı akım yoğunluklarına sahip şarj/deşarj eğrileri verilmiştir. Ayrıca Şekil 8C'de görülen hibrit yapının empedans değeri 1.02 ohm ölçülürken, eşdeğer direnç de empedans eğrisi içerisinde verilmiştir.



Şekil 8. BNKN@rGOH (15 mg/30 mg) hibrit yapısının A) farklı tarama hızlarındaki cv eğrileri, B) farklı akım yoğunluklarındaki şarj/deşarj eğrileri, C) empedans grafiği

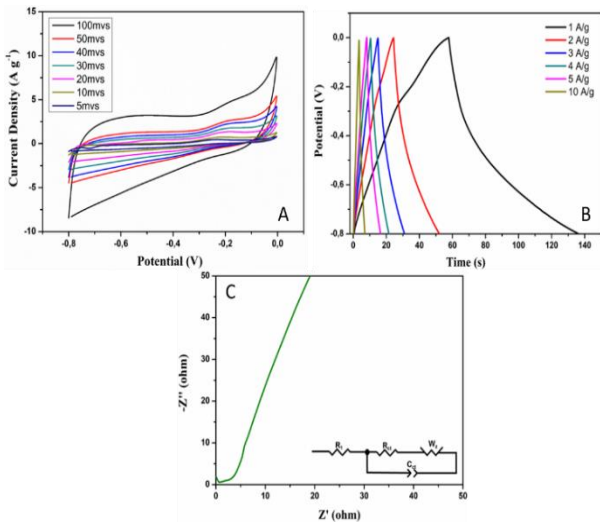
BNKN@rGOH nanokompozit malzemenin rGOH ile aynı oranlarda (30 mg/ 30 mg) katılanmasıyla oluşan CV eğrisi, şarj/deşarj eğrileri ve empedans grafiği Şekil 9'de verilmiştir. Aynı oranlarda katılan hibrit yapıda çıkan en yüksek spesifik kapasitans değeri, 207 F/g olarak bulunmuştur. BNKN@rGOH (15 mg/ 30 mg) hibrit yapısına

kıyasla kapasitans değerinin arttığı gözlenmiştir. BNKN@rGOH (30 mg/ 30 mg) yapısının, empedans değeri ve eşdeğer devre Şekil 9C'de 2.2 ohm olarak ölçülmüştür.



Şekil 9. BNKN@rGOH (30 mg/30 mg) hibrit yapısının A) farklı tarama hızlarındaki cv eğrileri, B) farklı akım yoğunluklarındaki şarj/deşarj eğrileri, C) empedans grafiği

Son olarak yapılan deneme çalışmalarında, BNKN@rGOH nanokompozitinde BNKN miktarını iki katına çıkartarak (60 mg) yapılan ölçümler Şekil 10'da verilmiştir. BNKN@rGOH (60 mg/30 mg) hibrit yapısında elde edilen en yüksek spesifik kapasitans değeri 5 mVs-1'de 139.75 F/g olarak bulunmuştur. Hibrit yapının empedans sonucu da 3.96 ohm olarak ölçülmüştür (Şekil 10C).



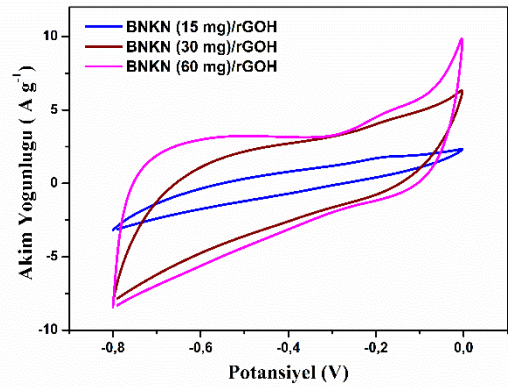
Şekil 10. BNKN@rGOH (60 mg/30 mg) hibrit yapısının A) farklı tarama hızlarındaki cv eğrileri, B) farklı akım yoğunluklarındaki şarj/deşarj eğrileri, C) empedans grafiği.

Tablo 3. Farklı oranlarda katkılanan BNKN@rGOH elektrotlarının elektrokimyasal parametreleri

Örnek	R ₁ (Ω)	R _{ct} (Ω)	C _{ct} (μF)	W _z (Ωs ^{-0.5})
BNKN@rGOH (15 mg/30 mg)	2.46	22.47	3.31	0.09
BNKN@rGOH (30 mg/30 mg)	1.47	13.56	5.31	0.22
BNKN@rGOH (60 mg/30 mg)	4.53	17.65	4.56	0.14

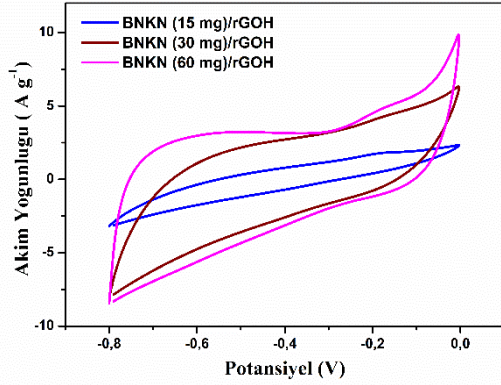
Tablo 3'te sırasıyla BNKN@rGOH (15 mg/30 mg), BNKN@rGOH (30 mg/30 mg), BNKN@rGOH (60 mg/30 mg) elektrotların elektrokimyasal parametreleri verilmektedir. Eşdeğer devre, iç direnç (R₁), elektriksel çift katman kapasitansı (C_{ct}), yük transfer direnci (R_{ct}) ve Warburg empedansı (W) olmak üzere dört elemandan oluşmaktadır. Tablo 3'ye göre, değiştirilen hibrit BNKN@rGOH bileşimlerinde en düşük R_{ct} direncinin BNKN@rGOH (30 mg/30 mg) elektroduna ait olması en optimum bileşimin oluşturulduğu ve elektriksel çift tabakadaki direnci düşürdüğü ifade edilebilir.

Bu çalışmalar sonucunda, BNKN@rGOH hibrit yapılarını içeren elektrotların CV eğrileri 5mVs-1'de en yüksek spesifik kapasitans değeri vermiştir. Düşük tarama hızında daha yüksek kapasitans etkisi görülmektedir. Çünkü çok yüksek tarama hızlarında oluşan yük dağılımı, elektrik alanındaki farkı koruyamadığı için, CV üzerindeki alan azalır ve bu nedenle kapasitans düşer. Şekil 11'da ise farklı katkılama oranlarıyla üretilen BNKN@rGOH hibrit elektrotların 100 mVs-1'de aynı potansiyel aralıkta ölçülen CV sonuçları detaylandırılmıştır [30].



Şekil 11. Farklı katkılama oranlarına sahip BNKN@rGOH elektrotunun 100mVs tarama hızındaki CV eğrileri

BNKN@rGOH elektrotunun kapasitans tutma eğilimi için yapılan stabilite çalışmalarında ise, en yüksek spesifik kapasitans değerine sahip olan hibrit yapının 1000 döngü sonrasında % 88.9 kapasitans tutma eğilimine sahip olduğu tespit edilmiştir (Şekil 12).



Şekil 12. BNKN@rGOH (30 mg/30 mg) oranında katkılan elektrota ait 1000 döngü sonucunda elde edilen kapasitans tutma eğilim grafiği

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, BNKN katkılanmış rGOH, tek adımda hidrotermal yöntemle aralarında kimyasal kovalent bağ oluşumuyla üretilmiştir. Kolay sentez yöntemi ile birlikte, BNKN ve rGOH arasındaki ara yüzey bağ kuvvetini arttırmak ve böylece elektrokimyasal özellikleri geliştirmek amaçlanmıştır. BNKN'nin rGOH yapısına dahil olmasıyla, rGOH yapısının mikro gözenek yapısı artırılmış olup, yük transfer direncini azaltılmıştır. Böylece rGOH'ın yüzey alanı artırılarak hibrit yapının kapasitans değerindeki iyileştirmeler ispatlanmıştır. Ek olarak, BNKN@rGOH, rGOH yüzeyine katkılanmış BNKN moleküllerinin hidrofilikliği nedeniyle gelişmiş yüklü taşıyıcı yoğunluğu ve kullanılan elektrolit ile uyumluluk göstermiştir. Sonuç olarak, BNKN ve rGOH arasındaki güçlü ara yüzey bağlanma kuvveti nedeniyle BNKN@rGOH hibrit yapısı, yüksek şarj depolama özelliği ve döngü kararlılığı (1000 döngüde tekrarlanan %88.9 spesifik kapasitans tutma eğilimi) göstermiştir. Ek olarak, üretilen BNKN@rGOH elektrotu 5 mvs-1 tarama hızında 207.5 F/g'lik yüksek bir spesifik kapasitans değeri de sergilemiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda, iyi bir elektrokimyasal performans gösteren BNKN@rGOH elektrotunun sentez stratejisinin ve yüksek performanslı enerji depolama cihazları için elektrot malzemelerinin geliştirilmesine yeni bir yaklaşımı temsil ettiğini göstermektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %8

Kaynaklar

- [1] Q. Ke, J. Wang, Graphene-based materials for supercapacitor electrodes – A review. *Journal of Materiomics*, 2, 37–54, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2016.01.001>.
- [2] C. Liu, F. Li, M. Lai-Peng, H. M. Cheng. *Advanced Materials for Energy Storage*. *Advanced Materials*, 22,28–62, 2010. <https://doi.org/10.1002/adma.200903328>.

- [3] T. Kuila, A. K. Mishra, P. Khanra, N. H. Kim & J. H. Lee. Recent advances in the efficient reduction of graphene oxide and its application as energy storage electrode materials. *Nanoscale*, 5, 52–71, 2012. [doi:10.1039/c2nr32703a](https://doi.org/10.1039/c2nr32703a).
- [4] Z. Li, K. Xu, Y. Pan. Recent development of Supercapacitor Electrode Based on Carbon Materials. *Nanotechnology Reviews*, 8, 35–49 2019. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2019-0004>.
- [5] Y. Wang, Z. Shi, Y. Huang, Y. Ma, C. Wang, M. Chen, Y. Chen. Supercapacitor devices based on graphene materials. *Journal of Physical Chemistry C*, 113, 13103–13107 2009. <https://doi.org/10.1021/jp902214f>.
- [6] C. F. Liu, Y. C. Liu, T. Y. Yi, C. C. Hu. Carbon materials for high-voltage supercapacitors. *Carbon*, 145, 529–548 2019. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.12.009>.
- [7] Y. B. Tan, J. M. Lee. Graphene for supercapacitor applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 1, 14814–14843, 2013. <https://doi.org/10.1039/C3TA12193C>.
- [8] M. M. Hantel, T. Kaspar, R. Nesper, A. Wokaun, R. Kötz. Partially reduced graphite oxide for supercapacitor electrodes: Effect of graphene layer spacing and huge specific capacitance. *Electrochemistry Communications*, 13, 90–92 2011. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2010.11.021>.
- [9] M. M. Hantel, T. Kaspar, R. Nesper, A. Wokaun, R. Kötz. Partially Reduced Graphite Oxide as an Electrode Material for Electrochemical Double-Layer Capacitors. *Chemistry – A European Journal*, 18, 9125–9136, 2012. <https://doi.org/10.1002/chem.201200702>.
- [10] V. B. Mohan, K. Lau, D. Hui, D. Bhattacharyya. Graphene-based materials and their composites: A review on production, applications and product limitations. *Composites Part B: Engineering*, 142: 200–220, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.01.013>.
- [11] Y. Lu, Y. Huang, M. Zhang, Y. Chen. Nitrogen-doped graphene materials for supercapacitor applications. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 14, 1134–1144, 2014. [doi:10.1166/jnn.2014.9102](https://doi.org/10.1166/jnn.2014.9102).
- [12] P. Karthika, N. Rajalakshmi, K. S. Dhathathreyan. Phosphorus-Doped Exfoliated Graphene for Supercapacitor Electrodes. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 13, 1746–1751, 2013. [doi:10.1166/jnn.2013.7112](https://doi.org/10.1166/jnn.2013.7112).
- [13] S. Saha, M. Jana, P. Khanra, P. Samanta, H. Koo, N. C. Murmu, T. Kuila. Band gap engineering of boron nitride by graphene and its application as positive electrode material in asymmetric supercapacitor device. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 7, 14211–14222, 2015. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b03562>.
- [14] X. Bian, R. Tuo, W. Yang, Y. Zhang, Q. Xie, J. Zha, S. He. Mechanical, Thermal, and Electrical Properties of BN-Epoxy Composites Modified with Carboxyl-Terminated Butadiene Nitrile Liquid Rubber. *Polymers*, 11, 1548 2019. <https://doi.org/10.3390>

- /polym11101548.
- [15] M. Li, G. Huang, X. Chen, J. Yin, P. Zhang, Y. Yao, J. Huang. Perspectives on environmental applications of hexagonal boron nitride nanomaterials. *Nano Today*, 44, 101486, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2022.101486>.
- [16] W. Auwärter. Hexagonal boron nitride monolayers on metal supports: Versatile templates for atoms, molecules and nanostructures. *Surface Science Reports*, 74, 1–95, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.surfrep.2018.10.001>.
- [17] S. Madarvoni, R. P. S. Sreekanth. Mechanical Characterization of Graphene—Hexagonal Boron Nitride-Based Kevlar–Carbon Hybrid Fabric Nanocomposites. *Polymers* 2022, 14, 2559, 2022. doi:10.3390/polym14132559.
- [18] L. Lin, Y. Xu, S. Zhang, I. M. Ross, A. C. M. Ong, D. A. Allwood. Fabrication and Luminescence of Monolayered Boron Nitride Quantum Dots. *Small*, 10, 60–65, 2014. <https://doi.org/10.1002/sml.201301001>.
- [19] D. Peng, L. Zhang, F. F. Li, W. R. Cui, R. P. Liang, J. D. Qiu. Facile and Green Approach to the Synthesis of Boron Nitride Quantum Dots for 2,4,6-Trinitrophenol Sensing. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 10, 7315–7323, 2018. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b15250>
- [20] H. Li, R. Y. Tay, S. H. Tsang, X. Zhen, E. H. T. Teo. Controllable Synthesis of Highly Luminescent Boron Nitride Quantum Dots. *Small*, 11, 6491–6499, 2015. <https://doi.org/10.1002/sml.201501632>
- [21] Y. Yang, C. Zhang, D. Huang, G. Zeng, J. Huang, C. Lai, W. Xiong. Boron nitride quantum dots decorated ultrathin porous g-C₃N₄: Intensified exciton dissociation and charge transfer for promoting visible-light-driven molecular oxygen activation. *Applied Catalysis B: Environmental*, 245, 87–99, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.12.049>.
- [22] Q. Zhang, Y. Peng, Y. Lin, S. Wu, X. Yu, C. Yang. Bisphenol S-doped g-C₃N₄ nanosheets modified by boron nitride quantum dots as efficient visible-light-driven photocatalysts for degradation of sulfamethazine. *Chemical Engineering Journal*, 405, 126661, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126661>
- [23] R. Jindal, V. Sharma, A. Shukla. Density functional theory study of the hydrogen evolution reaction in haeckelite boron nitride quantum dots. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 41783–41794, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.216>
- [24] L. Stagi, J. Ren, P. Innocenzi. From 2-D to 0-D Boron Nitride Materials, The Next Challenge. *Materials* 2019, 12, 3905, 2019. doi:10.3390/ma12233905.
- [25] W. S. Hummers, R. E. Offeman. Preparation of Graphitic Oxide. *Journal of the American Chemical Society*, 80, 1339, 1958. <https://doi.org/10.1021/ja01539a017>.
- [26] S. Gurunathan, J. W. Han, V. Eppakayala, J. H. Kim. Microbial reduction of graphene oxide by *Escherichia coli*: A green chemistry approach. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 102, 772–777, 2013. [10.1016/j.colsurfb.2012.09.011](https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2012.09.011).
- [27] B. Sert, S. Gonca, Y. Ozay, E. Harputlu, S. Ozdemir, K. Ocakoglu, N. Dizge. Investigation of the antifouling properties of polyethersulfone ultrafiltration membranes by blending of boron nitride quantum dots. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 205, 111867, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2021.111867>
- [28] K. Chu, X. Li, Y. Tian, Q. Li, Y. Guo. Boron Nitride Quantum Dots/Ti₃C₂T_x-MXene Heterostructure For Efficient Electrocatalytic Nitrogen Fixation. *Energy Environ. Materials*, 5, 1303–1309, 2022. <https://doi.org/10.1002/eem2.12247>.
- [29] W. Wenpeng, H. Zipan, X. Yukun, Z. Xinqun, C. Kaiyue, F. Jinchun, L. Xin, Z. Yang, Q. Liangti. A versatile, heat-resisting, electrocatalytic active graphene framework by in-situ formation of boron nitride quantum dots. *Carbon*, 192, 123–132, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.02.055>
- [30] B. Sert, Grafitik karbon nitrür ve hekzagonal bor nitrür içeren kompozit yapıların hazırlanması; çevre ve enerji uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, Tarsus Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Türkiye, 2022.





Application levels of urban transformation methods in zoning planning studies

İmar planlama çalışmalarında kentsel dönüşüm metotlarının uygulanma düzeyleri

Sıtkı Alper Özdemir^{1,*} , Mustafa Tolga Çögürçü² 

¹ İskenderun Technical University, Iskenderun Vocational School of Higher Education, 31200, Hatay Türkiye

² Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, 42250, Konya, Türkiye

Abstract

Urban transformation strategies should be included in zoning plans to take precautions against disasters caused by natural events such as floods and landslides and to identify building stocks that are not earthquake resistant. This study was conducted to determine the level of consideration of the need for urban transformation in development planning processes. Environment, Urbanization and Climate Change, and AFAD Provincial Directorates, all municipalities and universities in Adana province were determined as the population of this study. In this context, questions were asked to public personnel who urban transformation law enforcers and researchers through the expert opinion form are. Participant responses were analysed with frequency and percentage values, and responses regarding importance levels were analysed on a 5-point Likert scale. The data indicated that the issue of urban transformation is not sufficiently included in development planning practices and that the actions on this issue should be carried out. We suppose that making the necessary revisions in the relevant legislation, which is the basis of urban transformation, will ensure that urban transformation takes an important place in development planning studies.

Keywords: Zoning planning, Urban transformation, Expert opinion, Likert, Urban sustainability

1 Introduction

Zoning is the mechanism of regulating land use policies with a total perspective throughout the city by identifying deficiencies from the past and land uses that are not suitable for the sustainable life of the city, ensuring planned urban growth and development in order for the society to have a regular and healthy daily urban life [1]. Changes in population, migration potential of the city, technological urban developments, search for solutions to needs, as well as strengthening economic development, realising urban renewal works by protecting the existing texture, local governments can develop strategies through zoning activities and implement them technically and legally [2]. With zoning planning, analytical data about the area to be zoned are processed into maps and these maps are turned into open data on digital usage platforms [3].

The goal of achieving a healthy, aesthetic, and sustainable daily urban life can only be achieved through

Öz

Sel ve heyelan gibi doğa olayları kaynaklı afet durumlarına önlem almak, depreme dayanıklı olmayan yapı stoğunu belirlemek için kentsel dönüşüm stratejilerinin imar planlarında yer alması gerekir. Bu çalışma, kentsel dönüşüm ihtiyacının imar planlama süreçlerinde dikkate alınma düzeyini tespit etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Adana ilinde bulunan Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği ve AFAD İl Müdürlükleri, tüm belediyeler ve üniversiteler bu çalışmanın evrenini olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda kentsel dönüşüm kanun uygulayıcıları ve araştırmacıları olan kamu personellerine uzman görüş formu vasıtasıyla sorular yöneltilmiştir. Katılımcı cevapları frekans ve yüzde değerleriyle, önem derecelerine yönelik cevaplar ise 5' li Likert ölçeğine göre analiz edilmiştir. Veriler imar planlama çalışmalarında kentsel dönüşüm konusunun yeterince yer almadığını ve bu konu üzerine çalışmalar yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Kentsel dönüşümün dayanağı olan ilgili mevzuatlarda gerekli revizyonların yapılmasının, imar planlama çalışmalarında da kentsel dönüşümün önemle yer almasını sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: İmar planlama, Kentsel dönüşüm, Uzman görüşü, Likert, Kentsel sürdürülebilirlik

zoning plans prepared with the right strategies and targets. The determination and implementation of land use policies are realised as a result of the transfer of land use regulations and spatial planning studies to zoning plans [4].

Establishing a living space in a region or solving the requirements, needs and problems in the existing living space is only possible with the correct definition of that region. Geographical location, topographical features, proximity to fault lines, being in the natural disaster impact area, distance to neighbouring cities and socio-economic life connection or needs such as renewal of the city are the main elements that should be considered in zoning planning studies that are the basis of urban planning [5,6]. In particular, buildings constructed in violation of the zoning legislation are the main factors to be taken into consideration in terms of building stock Structures that need to be made earthquake-resistant, building areas that may be exposed to disaster situations caused by natural events such as floods,

* Corresponding author, e-mail: salper.ozdemir@iste.edu.tr (S. A. Özdemir)

Geliş / Recieved: 23.01.2024 Kabul / Accepted: 18.03.2024 Yayımlanma / Published: 15.04.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1424533

landslides and avalanches should be transformed and brought to healthy living conditions [7]. On the other hand, there is a need for transformation and revision for the relocation of industrial areas that have problems with their location and functionality within the city life, bringing historical and cultural assets that are left to decay out of use into daily socio-economic life, revising the transportation network according to the needs, and the development of green areas and social facilities depending on the population [8]. The solution for all of these transformations and revisions is to make the right urban regeneration planning strategies and practices and to reflect them in zoning planning [9].

In this study, it is aimed to select the appropriate urban regeneration methods that will enable the solutions of the problems of the cities and the necessary revisions to be made and to determine the level of reflectivity of urban regeneration studies to the zoning planning in terms of their current applications. In this context, questions were asked to public personnel who urban regeneration law implementers and researchers through an expert opinion form are. The answers received from the experts were analysed with frequency and percentage (%) values given in tables and the answers to the questions about the degree of importance were analysed according to the 5-point Likert scale and the degree of importance was determined [10].

The expert opinion form prepared with the ethics committee permission of Konya Technical University Scientific Research and Ethics Committee dated 27.07.2023 and numbered 2023/6 was shared with public personnel working in the position of law enforcement and / or researcher in urban transformation and zoning activities in Adana Province of Turkey, and according to the expert answers given, "The Level of Application of Urban Transformation Methods in Zoning Planning Studies" was analysed and conclusions were drawn.

2 Material and methods

The expert opinion form was applied to public personnel working in the Provincial Directorate of Environment, Urbanisation and Climate Change, Provincial Disaster and Emergency Directorate (AFAD), Metropolitan Municipality, District Municipalities and Universities in Adana Province of Turkey and answers were received. The questions in the expert opinion form were answered by 69 experts in total. Although the expert opinion was sufficient with 20 respondents, the number of participants was increased to 69 experts in order to increase the accuracy of the results due to the scarcity of precedent studies in the literature and the lack of similar studies in Turkey [11-14].

The answers were analysed with percentage/frequency data and evaluated according to the 5-point Likert Scale. The answers given by the public personnel to the questions were analysed in order to determine the degree of conformity or adequacy of the answers. In order to determine the degree of importance of the answers, the scale specified for each question weighted mean values, standard deviations and coefficients of variation of frequencies were calculated.

2.1 Likert scale

In Likert scale, evaluations are made with the points given to the options based on the sum of the ratings and indicating a degree in the scale [15]. Likert scaling was implemented by Rensis Likert in 1932 and has become the most widely used psychometric scale in research. Survey or expert opinion form respondents are asked to indicate their degree of agreement with the questions posed. For the 5-point Likert scale, the degree of agreement is ranked from 1 to 5, with the following degrees: least important (1), less important (2), important (3), more important (4) and most important (5). Depending on the form of the questions or the field of research, the degrees can also be shaped with the expression "agree" instead of "important" [16].

3 Results and discussions

The findings obtained according to the questions asked through the expert opinion form and the answers received from 69 experts are given below.

3.1 Public institution where respondents work

As seen in Figure 1, 30 (43.50%) of the experts who answered the questions in the expert opinion form work in universities, 22 (31.90%) in Adana Provincial Directorate of Environment, Urbanisation and Climate Change, 7 (10.10%) in Metropolitan Municipality, 6 (8.70%) in District Municipalities and 4 (5.80%) in AFAD.

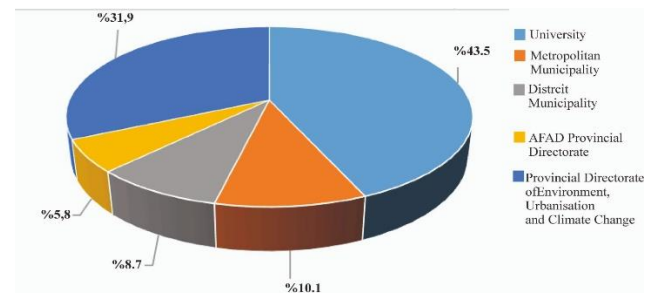


Figure 1. Public institution where the respondents work

3.2 Duration of professional experience

As seen in Figure 2, 11 (15.90%) of the respondents answered 1-5 years, 12 (17.40%) 6-10 years, 18 (26.10%) 11-15 years, 7 (10.10%) 16-20 years and 21 (30.40%) 20 years and more.

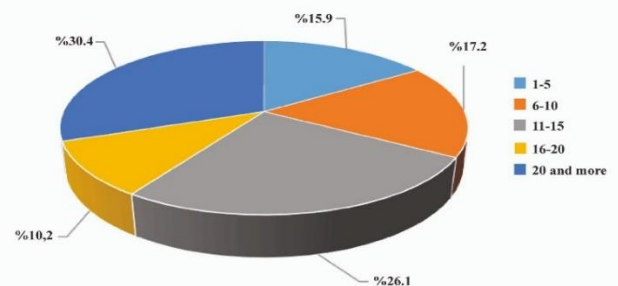


Figure 2. Duration of professional experience of the respondents

3.3 Importance assessment of urban regeneration methods

In Turkey, urban regeneration planning strategies and applications have been done depending on laws: 5393 (i.e., Municipal Law) or 6306 (i.e., the law of Transformation of Areas under Disaster Risk) [7]. According to the relevant laws, urban transformation processes are realised as building-based transformation and area-based transformation [17]. Building-based transformation can also be realised by the transformation of more than one building within a parcel. For these reasons, experts were asked about their importance rating preferences in the categories of building-based transformation, land-based transformation and area-based transformation in urban transformation and their answers were taken as shown in Table 1.

Table 1. Conversion type importance rating preferences

Transformation Type	1	2	3	4	5
	Least Imp.	Less Imp.	Imp.	More Imp.	Most Imp.
Building based	11	9	24	15	10
Land based	7	4	27	26	5
Area based	-	-	10	14	45

Imp: Important

3.3.1 Transformation type importance scoring

As a result of the answers given by the respondents to the expert opinion form, Table 2 shows the importance scores of building-based transformation, parcel-based transformation and area-based transformation.

Table 2. Conversion type importance scores

Transformation Type	1	2	3	4	5	Total
	Least Imp.	Less Imp.	Imp.	More Imp.	Most Imp.	
Building based	11	18	72	60	50	211
Land based	7	8	81	104	25	225
Area based	-	-	30	56	225	311

Imp: Important

3.3.2 Transformation type importance ranking

In Table 3, according to the answers given by the experts, the importance percentage values were calculated and the importance rankings of urban regeneration types were made. According to the results obtained, experts state that area-based transformation is the most important type of urban regeneration, parcel-based transformation is the second most important and building-based transformation is the third most important. Importance level values were determined according to the size of the percentage level values.

Table 3. Conversion type degree of importance

Transformation Type	0-100 Importance score	Percentage Importance	Importance Level
Building based	51.4	51.4%	3
Land based	56.5	56.5%	2
Area based	87.7	87.7%	1

According to the frequency & percentage distribution, the results of the answers given by the experts are given in Table 4.

Table 4. Percentage (%) & frequency distribution of answers

Transformation Type	(1- Least Important, 5-Most Important)									
	1		2		3		4		5	
	frq	%	frq	%	frq	%	frq	%	frq	%
Building based	11	15.94	9	13.04	24	34.78	15	21.74	10	14.49
Land based	7	10.14	4	5.80	27	39.13	26	37.68	5	7.25
Area based	0	0.00	0	0.00	10	14.49	14	20.29	45	65.22

frq: Frequency

The mean (Xao), standard deviation (σ), coefficient of variation (V) values calculated according to the frequency values of the choices were calculated. According to these values, it has been ensured that the experts consider area-based transformation as the first most important urban transformation type, parcel-based transformation as the second most important and building-based transformation as the third most important. Table 5 shows these values and their importance degrees according to the results.

Table 5. Significance according to coefficient of variation value

Transformation Type	Average (Xao)	Standard deviation (σ)	Coefficient of Variation (V)	Importance Level
Building based	2.36	1.43	0.6055	3
Land based	2.48	1.29	0.5222	2
Area based	4.22	0.79	0.1873	1

3.4 Implementing institutions in urban transformation works

The institutions involved in urban regeneration works in Turkey are the Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change, TOKİ, Municipalities and contractors. According to the answers received from 69 experts who responded to the expert opinion form, the importance preferences of the urban regeneration experts for the impact level in the studies are given in Table 6.

Table 6. Importance preferences of institutions related to urban transformation

Institution Name	1	2	3	4	5
	Least Imp.	Less Imp.	Imp.	More Imp.	Most Imp.
TOKİ	2	7	15	26	19
Related ministry	2	0	9	21	37
Municipality	5	0	13	25	26
Contractors	14	17	11	17	10

TOKİ: Public housing administration

3.4.1 Relevant institution importance rating

As a result of the answers given by the respondents to the expert opinion form, Table 7 shows the importance scores of urban transformation related institutions.

Table 7. Related institution importance scores

Institution Name	1 Least Imp.	2 Less Imp.	3 Imp.	4 More Imp.	5 Most Imp.	Total
TOKİ	2	14	45	104	95	260
Related ministry	2	0	27	84	185	298
Municipality	5	0	39	100	130	274
Contractors	14	34	33	68	50	199

TOKİ: Public housing administration

3.4.2 Relevant institution importance ranking

In Table 8, according to the answers given by the experts, the importance percentage values were calculated and the importance ranking of the related institutions of urban regeneration was made. According to the results obtained, the experts state that the most important institution in urban regeneration works is the relevant ministry, municipalities are in the second place, TOKİ is in the third place and contractors are in the last place. Importance level values were determined according to the size of the percentage level values.

Table 8. Relevant institution importance level

Institution Name	0-100 Importance score	Percentage Importance	Importance Level
TOKİ	69.2	69.2%	3
Related ministry	83.0	83.0%	1
Municipality	74.3	74.3%	2
Contractors	47.1	47.1%	4

TOKİ: Public housing administration

According to the frequency & percentage distribution, the results of the answers given by the experts are given in Table 9.

Table 9. Percentage & frequency distributions of the answers

Institution Name	(1- Least Important, 5-Most Important)									
	1		2		3		4		5	
	frq	%	frq	%	Frk	%	Frk	%	Frk	%
TOKİ	2	2.90	7	10,14	15	21,74	26	37,68	19	27,54
Related ministry	2	2.90	0	0,00	9	13,04	21	30,43	37	53,62
Municipality	5	7.25	0	0,00	13	18,84	25	36,23	26	37,68
Contractors	14	20.29	17	24,64	11	15,94	17	24,64	10	14,49

frq: Frequency

Mean (Xao), standard deviation (σ), coefficient of variation (V) values calculated according to the frequency values of the choices were calculated. According to these values, experts ranked the importance of urban transformation related institutions. Table 10 shows the ranking values and importance degrees according to the results.

Table 10. Significance levels according to coefficients of variation

Institution Name	Average (Xao)	Standard deviation (σ)	Coefficient of Variation (V)	Importance Level
TOKİ	3,33	1,14	0,3414	3
Related ministry	4,06	0,95	0,2330	1
Municipality	3,59	1,17	0,3243	2
Contractors	2,57	1,40	0,5475	4

TOKİ: Public housing administration

3.5 Urban transformation needs in zoning plans studies

In Turkey, zoning plan studies and revisions are carried out in accordance with the provisions of the Municipal Law No. 5393, Zoning Law No. 3194 and related legislation [4]. The reflection of urban regeneration planning strategies in zoning plans will be a factor in the realisation of urban regeneration practices. For this reason, through the expert opinion form, the importance of the need for urban regeneration in zoning plans was asked. 68,1% of the experts stated that this need was not considered sufficiently important in the zoning planning process, 29% stated that it was not considered important at all, and 2,9% stated that they considered the level of importance sufficient. According to the answers given by the experts, Figure 3 shows the preference status of the importance of urban regeneration need in zoning planning studies.

4 Conclusions

As a result of the increase in industrialisation all over the world since the 1950s, there has been a great migration from rural areas to cities. As a result of these migrations, rapid construction has formed the building stock of metropolises as uncontrolled, inadequate engineering and architectural services and illegal construction [18]. On the other hand, countries like Turkey, which are constantly exposed to earthquake-induced disasters, have made some legal arrangements as a precaution against negative situations such as earthquake resistance in the building stock and have initiated transformation practices in this way [19]. Law No. 775 on Slums, which entered into force in 1966, was the first legal regulation in the context of urban transformation and the fight against slums in Turkey [20]. Law No. 5393 on Municipalities, which entered into force in 2005, and Law No. 6306 on the Transformation of Areas Under Disaster Risk, which entered into force in 2012, have accelerated the clearest interventions in urban transformation planning strategies and practices in Turkey [21].

In Turkey, zoning plans and zoning plan revisions are made by municipalities in accordance with the provisions of the Zoning Law No. 3194, Municipal Law No. 5393 and related legislation. 1/5000 scale master zoning plans are prepared by metropolitan municipalities and zoning and construction applications are made according to 1/1000 scale implementation zoning plans prepared by district municipalities. Therefore, the main factor in giving direction to the cities with the correct zoning is the preparation of

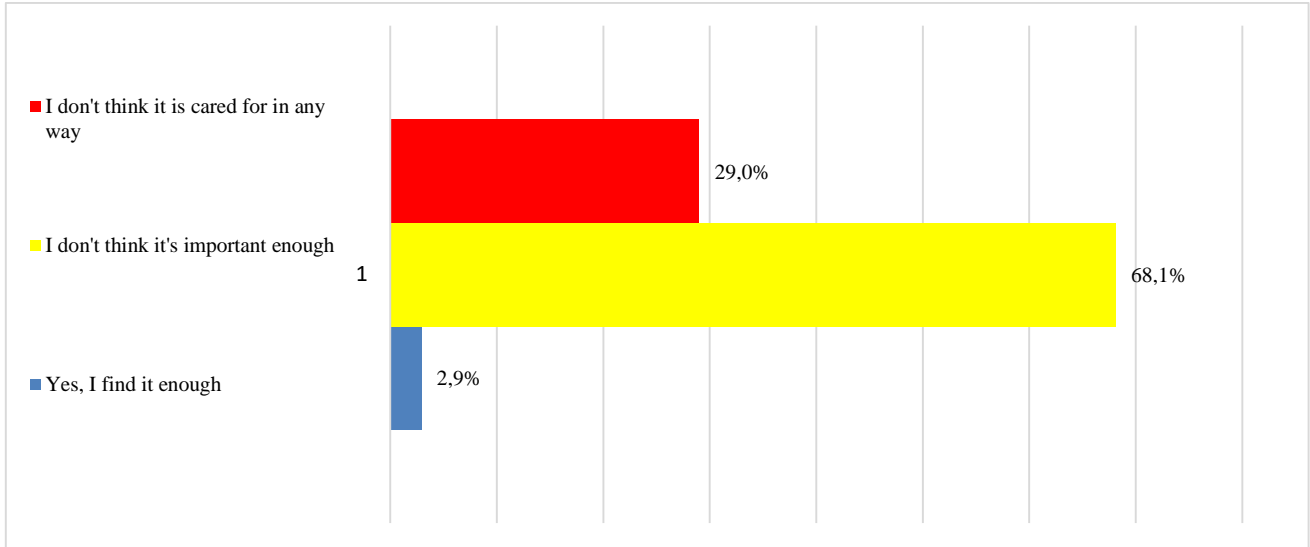


Figure 3. Respondents' views on need fulfilment

correct zoning plans and reflecting the transformation needs of the cities to the zoning plans prepared correctly [22].

Expert opinion form was applied to the technical personnel working in the institutions carrying out zoning plans and urban transformation studies and researches in Turkey. According to the answers received, it is seen that the most important application among urban transformation applications is "area-based transformation". As a matter of fact, Turkey is constantly exposed to disasters as a result of natural events such as earthquakes, floods, landslides and avalanches, and suffers loss of life and property [23]. For this reason, there is a need for urban regeneration practices that are not single based but area based (multiple) and that solve problems rapidly.

The most legally powerful institutions in urban regeneration planning and implementation are the Ministry of Environment, Urbanisation and Climate Change and municipalities. The answers received from the experts show that these are the two most important institutions in urban regeneration practices.

The most questionable issue that was asked to the experts and their answers were received is the importance of the need for urban transformation in Turkey in zoning planning studies. The most striking result of this study is that 97.1% (i.e., total percentage of answers to questions 1 and 2 indicated in Figure 3) of the experts working in relevant public institutions stated that they do not attach any importance to this need. Therefore, it is concluded that there is a need for additional legal regulations in order to take into account the reflection in the zoning plans, which play a key role in meeting the need for urban transformation, and to make municipalities take it into consideration compulsorily. Accordingly, we suggest that the need for urban transformation in the mentioned issues above will be taken into account in zoning planning applications by the revisions to be made in the relevant legislative provisions (Municipal Law No. 5393 and Zoning Law No. 3194) which are the legal basis for zoning planning and revision practices.

Conflict of interest

The authors have no conflict of interest with each other or with the authors themselves.

Similarity rate (iThenticate): 9%

References

- [1] G.Brown, S. Sanders and P. Reed, Using public participatory mapping to inform general land use planning and zoning. *Landscape and Urban Planning*, 177, 64–74, 2018. <https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2018.04.011>
- [2] Y.E. Coruhlu, B. Uzun and O. Yildiz, Zoning plan-based legal confiscation without expropriation in Turkey in light of ECHR decisions. *Land Use Policy*, 95, 104598, 2020. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2020.104598>
- [3] J. Liu, Y. Fang, Q. Yan, and C. Chen, Modern zoning plans versus traditional landscape structures: Ecosystem service dynamics and interactions in rapidly urbanizing cultural landscapes. *Journal of Environmental Management*, 331, 117315, 2023. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2023.117315>
- [4] D. Domingo, G. Palka, and A.M. Hersperger, Effect of zoning plans on urban land-use change: A multi-scenario simulation for supporting sustainable urban growth. *Sustainable Cities and Society*, 69, 102833, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2021.102833>
- [5] Z. Çetinkaya and A. Ciravoğlu, Sürdürülebilir yerleşim modellerinin karşılaştırılması: eko-kent ve yavaş kent. *IDEALKENT* 7, 18, 246–267, 2016. <https://dergipark.org.tr/en/pub/idealkent/issue/36793/419102>
- [6] S.Karabulut, A Novel urban transformation criteria from a Geosciences perspective: As case study in Bursa, NW Turkey. *Journal of Cleaner Production*,

- 195, 1437–1456, 2018.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.01.200>
- [7] S.A.Özdemir, M. T. Çoğürücü, M. A. Arslan, and M.Uzun, Kentsel dönüşüm planlama ve uygulama stratejilerinde 5393 ve 6306 sayılı kanunların karşılaştırılması. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 10, 4, 976–985, 2023.
<https://doi.org/doi.org/10.36306/konjes.1124708>
- [8] Y. Chen, Z. Liu, and B. B. Zhou, Population-environment dynamics across world's top 100 urban agglomerations: With implications for transitioning toward global urban sustainability. *Journal of Environmental Management*, 319, 115630, 2022.
<https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.115630>
- [9] K. Nagao and D. W. Edgington, Local industrial displacement, zoning conflicts and monozukuri planning in Higashi Osaka, Japan. *Land Use Policy*, 134, 106937, 2023.
<https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2023.106937>
- [10] E. Erdis and S. A. Ozdemir, Analysis of technical specification-based disputes in construction industry. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17, 7, 1541–1550, 2013. <https://doi.org/10.1007/S12205-013-0016-7/METRICS>
- [11] H.Abbasianjahromi and M. Aghakarimi, Safety performance prediction and modification strategies for construction projects via machine learning techniques. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 30, 3, 1146–1164, 2023.
<https://doi.org/10.1108/ECAM-04-2021-0303/FULL/PDF>
- [12] B.U.Ayhan and O. B. Tokdemir, Predicting the outcome of construction incidents. *Safety Science*, 113, 91–104, 2019.
<https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2018.11.001>
- [13] Y. Kedong, S. Zhou, and T. Xu, Research on optimization of index system design and its inspection method: Indicator design and expert assessment quality inspection. *Marine Economics and Management*, 2, 1, 1–28, 2019. <https://doi.org/10.1108/MAEM-10-2019-0010>
- [14] F. Roberti, U. F. Oberegger, E. Lucchi, and A. Troi, Energy retrofit and conservation of a historic building using multi-objective optimization and an analytic hierarchy process. *Energy and Buildings*, 138, 1–10, 2017.
<https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2016.12.028>
- [15] N. Mahat, J. Tah, C. Vidalakis, A. Khamaksorn, O. Thinnukool, and M. I. A. Malek, Data identification of determinants affecting the adoption of sustainable construction: The perspective of residential building developers. *Data in Brief*, 39, 107556, 2021.
<https://doi.org/10.1016/J.DIB.2021.107556>
- [16] S. E. Harpe, How to analyze Likert and other rating scale data. *Currents in Pharmacy Teaching and Learning*, 7, 6, 836–850, 2015.
<https://doi.org/10.1016/J.CPTL.2015.08.001>
- [17] T. Salihoğlu, A. N. Albayrak and Y. Eryılmaz, A method for the determination of urban transformation areas in Kocaeli. *Land Use Policy*, 109, 105708, 2021.
<https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2021.105708>
- [18] A. Alaybeyoğlu, U. Kılıç, A. İregöl and Y. Konbul, Kentsel dönüşümde mahalleler arası öncelik sıralaması: örnek bir karar destek sistemi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 21, 2, 377–377, 2016.
<https://doi.org/10.17482/uumfd.278133>
- [19] B. Tercan, Türkiye’de afet politikaları ve kentsel dönüşüm. *Abant Journal of Cultural Studies*, 3, 5: 102–120, 2018.
<https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/469664>
- [20] K. Karaman, Türkiye’de şehirleşme olgusu ve gecekondu sorunu. *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 2, 1, 108–117, 2003.
<https://dergipark.org.tr/en/pub/fudad/issue/46988/590217>
- [21] A. Çelikkbilek and Ş. M. Ç. Öztürk, 6306 Sayılı kanun kapsamında yürütülen kentsel dönüşüm çalışmaları ve İzmir uygulamaları. *Journal of Medeniyet Art*, 3, 2: 187–213, 2017.
<https://dergipark.org.tr/en/pub/medeniyetsanat/issue/33610/354957>
- [22] M. Haghani, S. Sabri, C. D. Gruyter, A. Ardeshiri, Z. Shahhoseini, T. W. Sanchez and M. Acuto, The Landscape and Evolution of Urban Planning Science. *Cities*, 136, 104261, 2023.
<https://doi.org/10.1016/J.CITIES.2023.104261>
- [23] S. Gerdan, Kentsel Planlama açısından il afet risk azaltma planlarının değerlendirilmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, 10, 4, 1006–1013, 2021.
<https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1741298>



Appendix 1

Uzman Görüş Formu

Değerli katılımcı,

“Kentsel Dönüşümde Sürdürülebilir İndikatörlerle Alan Belirlenmesi” başlıklı doktora tez çalışmasında uzman görüşlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu hedefle, çalışma için değerlendirme indikatörleri belirlenmiştir.

Çalışmadaki amaç; belirlenen indikatörler ile kentsel dönüşüm riskli alan tespiti konusunda etkili olabilecek bir ölçme aracı oluşturmaktır.

Uzman görüş formu 1. bölümde demografik bilgiler, mesleki özellikler ve kentsel dönüşüm hakkındaki görüşler, 2. bölümde ise değerlendirme ifadeleri yer almaktadır.

Cevaplar bilimsel araştırma dışında asla başka bir amaçla kullanılmayacaktır.

Lütfen formda yer alan hiçbir soruyu boş bırakmadan size en uygun gelen seçeneği (x) işaretleyerek cevaplandırınız.

Katkılarınız için teşekkür eder, çalışmalarınızda başarılar dileriz.

A. Demografik Özellikler, Mesleki Özellikler ve Kentsel Dönüşüm Hakkındaki Görüşler

1. Cinsiyetiniz

Erkek Kadın

2. Medeni durumunuz

Bekâr Evli

3. Yaş aralığınız

20-30 31-40 41-50 51-60 61 ve üstü

4. Eğitim düzeyiniz

Önlisans Lisans Yüksek Lisans Doktora

5. Mesleki unvanınız

İnşaat Mühendisi Mimar Şehir Plancısı Harita Mühendisi Jeoloji Mühendisi Avukat

Jeofizik Mühendisi Tekniker

6. Çalıştığınız kamu kurumu

Üniversite Büyükşehir Belediyesi İlçe Belediyesi AFAD Çevre, Şehircilik ve İklim Değ. İl Müdürlüğü

7. Mesleki deneyim süreniz (Yıl)

1-5 6-10 11-15 16-20 20 ve üstü

8. Çalışma bölgenizdeki mesleki deneyiminiz (Yıl)

1-5 6-10 11-15 16-20 20 ve üstü

9. Kentsel dönüşüm çalışmalarında görev aldınız mı?

(Birden çok seçenek işaretlenebilir)

Kentsel dönüşüm projelendirmelerinde görev aldım

Riskli Alan tespiti, dosya hazırlanması ve ilgili çalışmalarda görev aldım

Rezerv Alan tespiti, dosya hazırlanması ve ilgili çalışmalarda görev aldım

Riskli Bina tespiti, dosya hazırlanması ve ilgili çalışmalarda görev aldım

Herhangi bir kentsel dönüşüm çalışmasında yer almadım

10. Sürdürülebilir şehirlerin oluşturulmasında kullanılan kentsel dönüşüm metotlarının önem derecelerini 1 ile 5 arasında puanlayarak değerlendiriniz.

Dönüşüm Türü	1 En az önemli	2 Az önemli	3 Önemli	4 Daha önemli	5 En önemli
Bina bazlı dönüşüm					
Arsa bazlı dönüşüm					
Alan bazlı dönüşüm					

11. Kentsel dönüşüm planlama ve uygulama çalışmalarında size göre en etkili ve avantajlı yasa hangisidir?

5393 Sayılı Belediye Kanunu 73. madde ve ilgili maddeler

6306 Sayılı Afet Riski Altındaki Alanlarında Dönüştürülmesi Hakkında Kanun

() Mevcut kanunları yetersiz buluyorum

12. İmar revizyon planları yapılırken kentsel dönüşüm ihtiyacının önemsiz olarak yapıldığını düşünüyor musunuz?

() Evet, yeterli buluyorum.

() Yeterince önemsiz olduğunu düşünmüyorum

() Hiçbir şekilde önemsiz olduğunu düşünmüyorum

13. Kentsel dönüşüm çalışmalarında (riskli alan/rezerv alan ilanı, projelendirme ve yapım) uygulayıcı olan kurumların bu çalışmalarda önem derecesi ne olmalıdır? 1 ile 5 arasında puanlayınız.

Kurum Adı	1 En az önemli	2 Az önemli	3 Önemli	4 Daha önemli	5 En önemli
TOKİ					
İlgili bakanlık					
Yerel idareler (Belediyeler)					
Müteahhitler					





Farklı hidrometeorolojik fenomenlerin karakterlerindeki değişimin zamana bağlı olarak iklim değişikliği çerçevesinde incelenmesi: Anamur örneği

Examining the changes in the characteristics of different hydrometeorological phenomena over time within the framework of climate change: Anamur case study

Volkan Yılmaz^{1,*} 

¹ Konya Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 42250, Konya Türkiye

Öz

Bu çalışmada Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından işletilen 17320 numaralı Anamur istasyonunda 2002-2019 yılları arasında ölçülen aylık veriler kullanılarak bölgedeki hâkim olguların karakterindeki değişim zamana bağlı olarak iklim değişikliği çerçevesinde incelenmiştir. Bu amaçla verilere Faktör Analizi (FA) dinamik bir biçimde uygulanarak zamansal değişim izlenmiş ve elde edilen bulgular iklim değişikliği çerçevesinde yorumlanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda sıcaklık ve rüzgâr olmak üzere bölgede iki hâkim fenomenin var olduğu ve bu iki olgunun da zamanla etkisini arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Diğer taraftan yapılan çalışmadan elde edilen bulgular doğrultusunda Sıcaklık, Açık Yüzey Buharlaşması, Rüzgâr Hızı ve Nisbi Nem parametrelerinin 2011-2019 yılları arasında etkilerini sırasıyla %2.61, %3.32, %3.38 ve %13.60 oranlarında arttırdıkları görülmüştür. Yine elde edilen bulgular bölgede iklim değişikliğinin etkisinin var olduğunu göstermektedir. FA'nın dinamik bir biçimde uygulanması olguların karakterlerindeki değişimin incelenmesinde oldukça verimli bir yaklaşım tarzı oluşturmuş olup bu yaklaşım tarzı mevcut çalışmanın yenilikçi ve orijinal yönünü temsil etmektedir.

Anahtar kelimeler: Anamur, Faktör analizi, İklim değişikliği

1 Giriş

Üzerinde yaşadığımız dünyada hayatın devamı için gerekli olan suyun bir döngü halinde yer değiştirdiği bilinen bir gerçektir. Bu döngüye ait birçok eleman doğrudan ya da dolaylı olarak iklim değişikliğinden etkilenmekte ve bu durum farklı şekillerde yeryüzündeki yaşamı etkilemektedir [1, 2]. İklim değişikliği temelinde endüstrileşme öncesi döneme göre artan sera gazı emisyonundan kaynaklanmaktadır [3]. İnsan kaynaklı sera gazı emisyonu 18. yy'm ortalarından beri önemli ölçüde artmış ve bu dönem içerisinde ortalama dünya sıcaklığı yaklaşık olarak 0.8 °C yükselmiştir [4]. Diğer taraftan mevcut ilerlemenin devam etmesi halinde küresel ısınmanın 2030 ila 2052 yılları arasında 1.5 °C ye ulaşacağı tahmin edilmektedir [5]. Bu aşamada iklim değişikliği kaynaklı artan sıcaklıklar

Abstract

In this study, using monthly data measured between 2002 and 2019 at the Anamur station number 17320, operated by the General Directorate of Meteorology, the change in the character of the dominant phenomena in the study area was examined within the framework of climate change over time. For this purpose, Factor Analysis (FA) was dynamically applied to the data to monitor temporal changes and the findings were interpreted within the framework of climate change. As a result of the study, it was concluded that there are two dominant phenomena in the study area, namely temperature, and wind and that these two phenomena increase their effects over time. On the other hand, in line with the findings obtained from the study, it was observed that the Temperature, Open Surface Evaporation, Wind Speed and Relative Humidity parameters increased their effects by %2.61, %3.32, %3.38 and %13.60, respectively, between 2011 and 2019. Again, the findings show that there is an impact of climate change. The dynamic application of FA has created a very productive approach to examining the change in the characters of the phenomena, and this approach represents the innovative and original aspect of the current study.

Keywords: Anamur, Climate change, Factor analysis

sebebiyle yağış, buharlaşma ve yüzeysel akış gibi birçok hidrolojik çevrim elemanında önemli değişiklikler oluşmaktadır [6]. Özellikle sıcaklık değerlerinin artmasıyla birlikte yoğun yağış ve fırtına olayları ile taşkın ve kuraklık gibi hayatı önemli ölçüde etkileyen hadiselerin şiddet ve sıklığında artmalar meydana gelmiştir [7]. Bu kapsamda hayatı doğrudan etkileyen ve her geçen gün daha da özel bir konuma yerleşen su varlığını etkileyen birçok hidrometeorolojik değişkenin iklim değişikliğinden etkilendiği görülmektedir [8].

İklim değişikliği konusu ilk kez 1992 yılında Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nin kabul edilmesiyle küresel bir konuma yerleşmiş olup ilgili sözleşme 1994 yılında yürürlüğe girmiştir. Devamında ise her yıl düzenlenen Taraflar Konferansı (Conference of the Parties, COP) ile bu konuda küresel bir farkındalık

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: vyilmaz@ktun.edu.tr (V. Yılmaz)

Geliş / Received: 30.11.2023 Kabul / Accepted: 25.03.2024 Yayınlanma / Published: 15.04.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1398407

oluşturulmaya çalışılmaktadır. Özellikle 1997'de Kyoto'da düzenlenen 3. taraflar konferansında (COP3) sera gazlarının azaltılması için bağlayıcı hedefler ortaya konmuş ve 2015 yılında Paris'te düzenlenen COP21'de Paris Anlaşması kapsamında önemli hedefler belirlenmiştir. Paris Anlaşmasında küresel sıcaklık artışının endüstri öncesi döneme göre 2 °C'nin altında tutulması gerektiği ve küresel ısınmanın etkilerini önemli ölçüde düşürebilmek amacıyla ısınmanın 1.5 °C'de sınırlandırılması yönünde bir hedef belirlenmiştir. Bu çerçevede Paris Anlaşmasının uzun dönemli sıcaklık artışı hedefi sıfır emisyon temasıyla desteklenmiştir [9].

İklim değişikliği küresel olarak bütün dünya üzerinde etkisini gösterse de dünya üzerindeki farklı bölgelerin diğerlerine kıyasla daha fazla ısındığı görülmektedir. Bu bölgelerden birisi ise Akdeniz havzası olarak ifade edilebilir [10]. Hükümetlerarası iklim değişikliği panelinin (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 6. değerlendirme raporuna (Sixth Assessment Report, AR6) göre dünya çapındaki kuraklık ve sel kaynaklı doğal afetlerin önemli bir kısmının Akdeniz bölgesinde meydana geldiği ifade edilmiştir [11]. IPCC AR6'da Akdeniz bölgesinin yüzey sıcaklığının endüstrileşme öncesi döneme kıyasla 1.5 °C daha yüksek olduğu belirtilmiş olup özellikle Kuzey Akdeniz bölgesinde kuraklığın daha sık ve şiddetli bir şekilde meydana geldiği ifade edilmiştir. Yine aynı raporda özellikle Kuzey Akdeniz bölgesi için yağış anomalilerinin gerçekleşeceği ve havzanın birçok bölgesinde kuraklık hadiselerinin daha yaygın bir şekilde meydana geleceği öngörülmektedir [12]. Bu değerlendirmeler ışığında ülkemizin de büyük bir kısmının içinde bulunduğu Doğu Akdeniz havzasının iklim değişikliğinden önemli bir şekilde etkilenmekte olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla sınırlı durumda bulunan su kaynaklarının daha verimli bir şekilde kullanılabilmesi adına iklim değişikliğinin hidrolojik çevrim elemanlarına olan etkisinin araştırılması oldukça önemlidir.

Bu amaçla mevcut çalışmada farklı hidrometeorolojik değişkenlerin karakterlerindeki değişimler zamana bağlı olarak iklim değişikliği çerçevesinde incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne bağlı 17320 numaralı Anamur istasyonunda 2002-2019 yılları arasında ölçülmüş aylık veriler kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda öncelikle 2002-2012 yılları arasındaki verilere Faktör Analizi (FA) uygulanarak veri grubunun karakteristiği incelenmiş, devamında ise her adımda veri seti bir ay artırılarak FA uygulamasına devam edilmiştir. Bu şekilde FA dinamik bir biçimde veri setine uygulanmıştır. Bu sayede zaman içerisinde veri setinin karakterindeki değişim gözlemlenmiştir. FA'nın bu şekilde uygulanması mevcut çalışmanın orijinal ve yenilikçi yönünü oluşturmaktadır. Bu sayede üzerinde çalışılan parametrelerdeki değişimin kaynağı daha basit ve anlaşılabilir bir şekilde ortaya çıkartılabilmektedir. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen bulgular iklim değişikliği çerçevesinde yorumlanarak önemli çıktılar elde edilmiştir.

2 Materyal ve metot

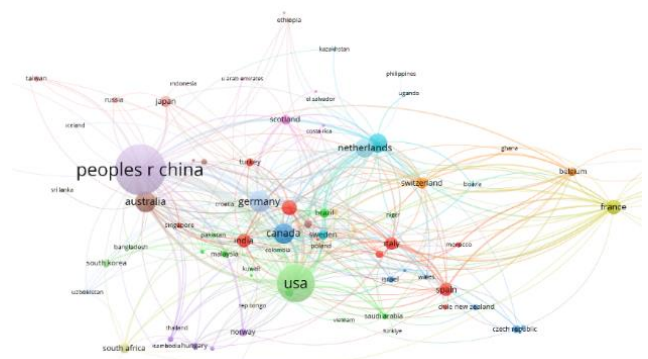
2.1 Çalışma alanı

Mevcut çalışmada 17320 numaralı Anamur meteoroloji istasyonuna (36°04'K/32°51'D) ait 2002-2019 yılları arasında ölçülmüş aylık veriler kullanılmıştır. Çalışma bölgesi daha önce de belirtildiği gibi iklim değişikliğinin yoğun bir şekilde gözlemlendiği ifade edilen Doğu Akdeniz bölgesinde yer almaktadır [10, 11]. Üzerinde çalışılan Anamur meteoroloji istasyonunun harita üzerindeki konumu Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. 17320 numaralı Anamur meteoroloji istasyonunun harita üzerindeki konumu

Küresel iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkisinin araştırıldığı çalışmaların ülkeler bazında incelenmesi amacıyla Web of Science veri tabanında “su kaynakları” ve “iklim değişikliği” başlıkları altında Science Citation Index Expanded indeksinde su kaynakları kategorisinde yayımlanmış makaleler incelenmiş ve ülkelere göre sınıflandırması VOSViewer uygulaması ile elde edilmiş ve Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 2 incelendiğinde Türkiye'nin bu alanda yapılmış olan çalışmaların yoğunlaştığı bir grupta yer aldığı ve aynı küme içerisinde İtalya ve İspanya gibi yine Akdeniz'e kıyısı olan ülkelerinde dahil olduğu görülmektedir.



Şekil 2. “iklim değişikliği” ve “su kaynakları” başlıkları için filtrelenmiş makalelere ait ülke bazlı VOSViewer çıktısı

Mevcut çalışmada Anamur meteoroloji istasyonunda 2002-2019 yılları arasında ölçülen Aylık Ortalama Nisbi Nem (NN, %), Aylık Ortalama Aktüel Basınç (AB, hPa), Aylık Ortalama Sıcaklık (S, °C), Aylık Ortalama Rüzgâr Hızı (RH, m/s), Aylık Toplam Yağış (Y, mm) ve Aylık Toplam Açık Yüzey Buharlaşması (AYB, mm) değerleri

kullanılmıştır. Bu parametrelere ait detaylı sayısal bilgiler ise **Tablo 1**'de gösterilmiştir. **Tablo 1**'de verilen bilgiler ışığında AYB'nin en fazla S ve AB parametreleriyle ilişkili olduğu ve Y dışında kalan diğer parametrelerin normal dağılıma daha yakın bir dağılım sergilediği görülmektedir. Çalışmada kullanılan parametrelere ait zaman serisi grafikleri ise **Şekil 3**'te gösterilmiştir. **Şekil 3** incelendiğinde özellikle 2009 yılından sonra RH değerlerinde kayda değer bir artış meydana geldiği dikkat çekmektedir. Diğer taraftan NN değerlerinde belirgin bir azalma trendinin görüldüğü ve S değerlerinde ise özellikle kış aylarında bir artış eğiliminin olduğu söylenebilir.

2.2 Faktör analizi

Faktör Analizi (FA) fazla sayıda parametreden oluşan bir veri setinin daha az sayıda faktörle açıklanmasını sağlayan çok değişkenli bir istatistiksel analiz yöntemidir. FA yardımıyla üzerinde çalışılan veri setindeki baskın fenomenler ortaya çıkartılabilir ve bu şekilde veri setinin anlaşılması daha kolay hale gelebilir. Diğer taraftan üzerinde çalışılan veri seti içerisindeki herhangi bir parametrenin yüksek yük değerleri aldığı faktör içerisindeki diğer parametreler kullanılarak daha başarılı modeller kurulabilir. FA'ya başlamadan önce verilerin uygunluğu farklı testlerle kontrol edilir. Kaiser Meyer Olkin (KMO) değeri bu amaçla sıklıkla kullanılmaktadır. KMO değeri 0.5'in üzerinde ise kullanılan veri setinin FA için uygun olduğu söylenebilir [13].

FA'da toplam varyansı fazla bilgi kaybına uğratmadan anlamlı bir şekilde açıklayabilecek faktör sayısının belirlenmesi için öncelikle anabilesenlere ait özdeğerlerin hesaplanması gerekir. Burada farklı yöntemler kullanılsa da en bilindik yöntem Ana Bileşenler Analizi (ABA) yöntemidir. ABA yöntemiyle herbir anabilesene ait özdeğerler ve bu anabilesenlerin toplam varyansı açıklama payları hesaplanır. Özdeğeri 1'den büyük anabilesen sayısı ya da toplam varyansın en az 2/3'ünü açıklayan toplam anabilesen sayısı faktör sayısı olarak belirlenebilir [14]. Faktör sayısı belirlendikten sonra her bir parametrenin faktörler altında aldıkları yük değerlerini gösteren komponent matrisleri oluşturulur. Burada her bir parametrenin hangi faktör altında daha fazla yük değeri aldığı incelenir. Faktörler altında yüksek yük değeri alan parametrelerin karakterleri doğrultusunda faktörler isimlendirilebilir. Bu sayede üzerinde çalışılan veri seti içindeki baskın fenomenler ortaya çıkartılmış olur.

3 Bulgular ve tartışma

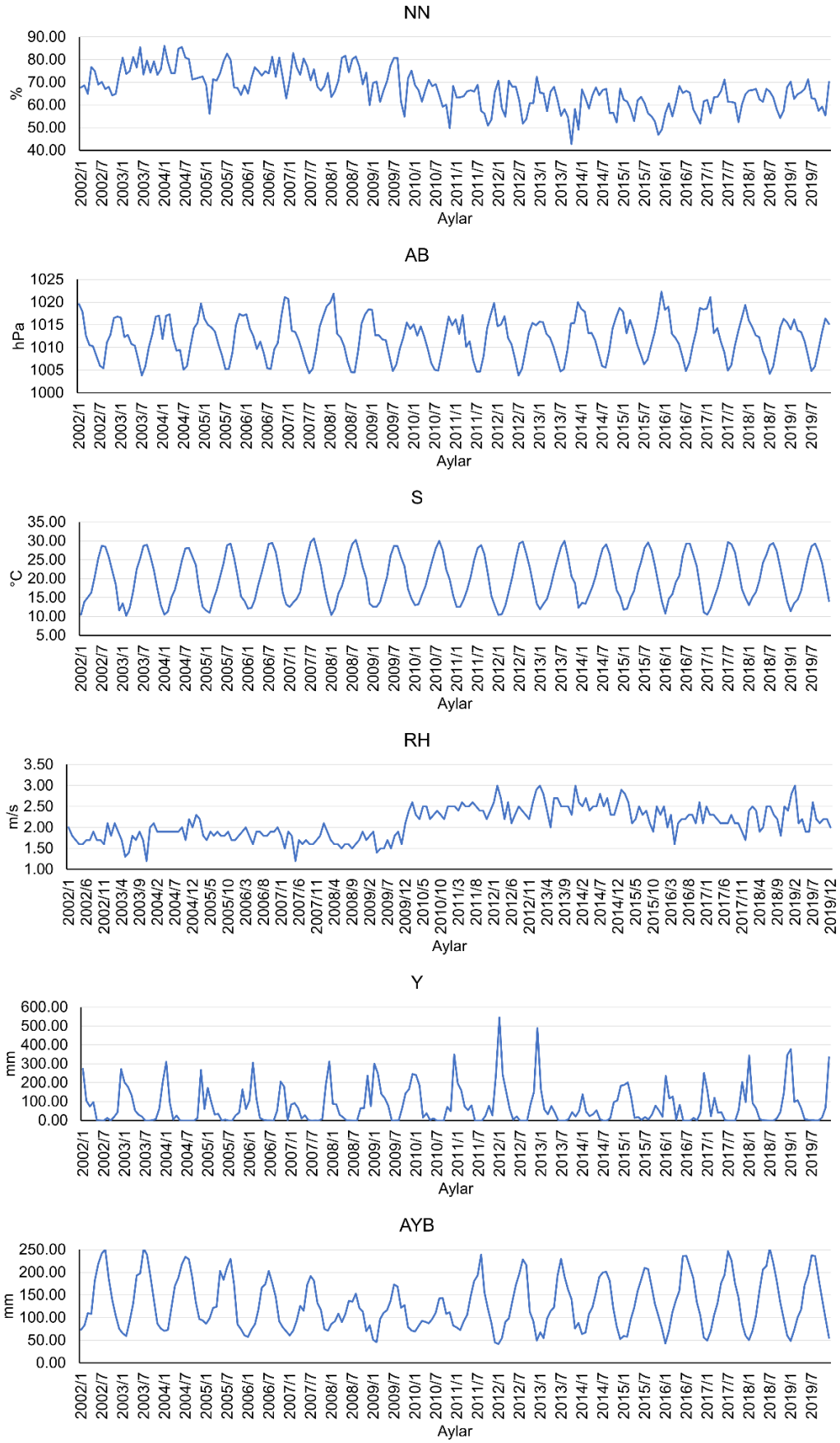
Bu çalışma kapsamında 2002 yılı ocak ayı ile 2011 yılı aralık ayı arasında ölçülmüş olan verilere FA uygulanmış ve 120 aylık süre zarfındaki veri setinin karakteristiği belirlenmeye çalışılmıştır. İlk 120 aylık veri seti için KMO değeri 0.701 olarak elde edilmiş ve kullanılan veri setinin FA için uygun olduğu görülmüştür. Bu veri seti için elde edilen özdeğerler ve bu özdeğerlerin toplam varyansı açıklama yüzdeleri **Tablo 2**'de gösterilmiştir. **Tablo 2** doğrultusunda ilk iki anabilesenin özdeğerinin 1'in üzerinde olması ve bu anabilesenlerin toplam varyansın %77.828'ini açıklamış olması sebebiyle ilk 10 yıllık veri seti için geçerli faktör sayısının 2 olmasına karar verilmiştir. Parametrelerin faktörler altında aldıkları yük değerleri elde edilmiş ve **Tablo 3**'te gösterilmiştir. **Tablo 3** incelendiğinde 2002 ile 2012 yılları arasında kapsayan veri seti için S, AYB ve AB parametrelerinin birinci faktörde, RH ve NN parametrelerinin ise ikinci faktörde daha fazla yük değeri almış oldukları görülmektedir. Bu kapsamda ağırlıklı olarak birinci faktörde sıcaklık ve ikinci faktörde ise rüzgâr fenomeninin daha baskın olması sebebiyle bu iki faktör sırasıyla sıcaklık ve rüzgâr etkisi olarak isimlendirilmiştir.

Çalışmanın bundan sonraki kısmında her adımda veri setine bir ay daha dahil edilerek her aşamada FA uygulanmış ve sonuçları kaydedilmiştir. Bu şekilde her adımda veri setine bir ay daha dahil edilerek veri setinin karakteristiğindeki değişim dinamik bir şekilde izlenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda her bir adım sonrasında faktörlerin toplam varyansı açıklama yüzdeleri ve KMO değerleri kaydedilerek **Şekil 4**'te gösterilmiştir. **Şekil 4** doğrultusunda bütün FA uygulamalarında geçerli faktör sayısı 2 olarak belirlenmiş olup bütün analizlerde KMO değerinin FA için uygun olduğu görülmektedir. Diğer taraftan yapılan çalışmalar sonucunda her bir analize ait ilk 2 özdeğer bilgileri **Şekil 5**'te gösterilmiştir. Bu kapsamda bütün FA analizlerinde ilk iki anabilesenin 1'in üzerinde özdeğer bilgisi ürettiği görülmektedir.

FA'nın veri setine dinamik bir şekilde uygulanması sonucunda parametrelerin her iki faktör altında almış oldukları yük değerlerinin zamanla değişimi ise **Şekil 6**'da gösterilmiştir. **Şekil 6** incelendiğinde özellikle S parametresinin sıcaklık etkisini temsil eden 1. Faktör altında almış olduğu yük değerlerinin zamanla arttığı görülmektedir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan meteorolojik parametreler için 2002-2019 yılları arasına ait istatistiki bilgiler

	NN	AB	S	RH	Y	AYB
Minimum	42.70	1003.80	10.20	1.20	0.00	42.00
Ortalama	66.76	1012.14	20.16	2.10	76.52	130.06
Maksimum	86.00	1022.30	30.70	3.00	545.20	253.30
Standart Sapma	8.47	4.52	6.18	0.38	99.23	56.52
Çarpıklık	-0.01	-0.04	0.09	0.14	1.80	0.45
Basıklık	-0.32	-0.87	-1.38	-0.63	3.55	-0.93
AYB ile Korelasyon	0.06	-0.83	0.87	-0.11	-0.68	1.00



Şekil 3. Çalışmada kullanılan parametrelere ait zaman serisi grafikleri

Bu kapsamda **Şekil 6** doğrultusunda sıcaklık fenomeninin toplam veri seti içindeki etkisinin son 8 yıl içerisinde giderek artmış olduğu görülmektedir. 2011 yıl sonu itibarıyla S parametresinin 1. Faktör altındaki yük değeri **Tablo 3**'te görüldüğü gibi 0.919 iken bu değer 2019 yıl sonunda 0.943'e yükselmiş olup bu artış trendi zaman içerisinde sürekli artış şeklinde kendini göstermektedir.

Tablo 2. İlk 120 aylık veri seti için FA analizi sonucunda elde edilen özdeğerler ve özdeğerlerin toplam varyansı açıklama yüzdeleri

Anabileşen	Özdeğerler	Toplam Varyansın Açıklanma %'si	Toplam %
1	3.335	55.586	55.586
2	1.335	22.242	77.828
3	0.668	11.135	88.963
4	0.336	5.606	94.569
5	0.217	3.623	98.192
6	0.109	1.808	100.000

Diğer taraftan AYB parametresinin 1. Faktör altında 2011 yıl sonu itibarıyla almış olduğu yük değeri 0.903 iken bu değer 2019 yıl sonunda 0.933'e yükselmiştir. Yine S parametresinde olduğu gibi AYB parametresinde de zaman içerisinde sürekli artan bir trendin olduğu **Şekil 6** doğrultusunda söylenebilir. Bu kapsamda S ve AYB parametrelerinin etkilerini 8 yıl içerisinde sırasıyla %2.61 ve %3.32 oranında arttırmış oldukları yapılan çalışmalardan elde edilen bulgular doğrultusunda söylenebilir.

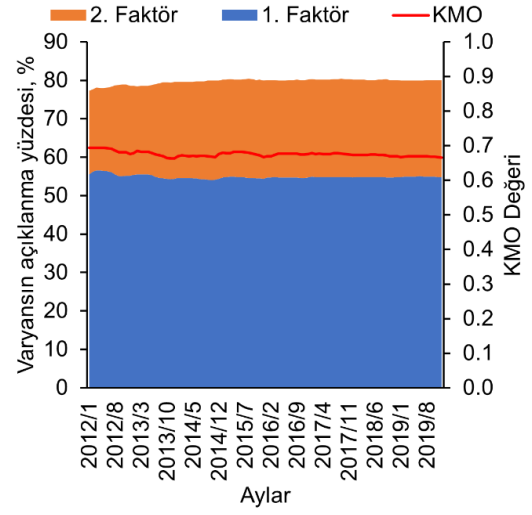
Tablo 3. İlk 120 aylık veri seti için parametrelerin yük değerleri

Parametre	1.Faktör	2. Faktör
S	0.919	0.178
AB	0.896	0.131
AYB	0.903	0.155
NN	0.391	0.772
RH	0.325	0.797
Y	0.784	0.178

Bu aşamada buharlaşmanın zaman içerisinde sıcaklık fenomeninden daha fazla etkilenmekte olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu kapsamda buharlaşmanın zaman içerisinde sıcaklığın etkisine daha fazla girmesi iklim değişikliğinin buharlaşma fenomenini de etkilemiş olduğunu göstermektedir. **Tablo 3**'te görüldüğü gibi daha çok 1. Faktörde kendisini gösteren AB parametresi de S ve AYB parametreleri gibi 1. Faktör altında almış olduğu yük değerlerini arttırmıştır.

FA ile yapılan dinamik analiz sonucunda elde edilen **Şekil 6** özellikle RH ve NN parametreleri doğrultusunda incelendiğinde yine **Tablo 3**'te olduğu gibi bu iki parametrenin 2. Faktörde daha fazla yük değeri almış olduğu görülmektedir. Yine **Şekil 6** incelendiğinde bu iki parametrenin 2. Faktör altında almış olduğu yük değerleri

de zamanla artmıştır. RH ve NN parametrelerinin 2011 yıl sonu itibarıyla 2. Faktör altında aldıkları yük değerleri sırasıyla 0.797 ve 0.772 iken bu değerler 2019 yıl sonunda 0.824 ve 0.877 değerlerine ulaşmıştır. Bu kapsamda da RH ve NN parametreleri zaman içerisinde etkilerini sırasıyla %3.38 ve %13.60 oranlarında arttırmışlardır. Y parametresi ise 2002-2012 yılları arası için elde edilmiş olan sonuçlar doğrultusunda 1. Faktör altında daha fazla yük değeri almış olsa da diğer parametrelerde olduğu gibi zaman içerisinde belirgin bir artış ya da azalış trendi göstermemiştir.

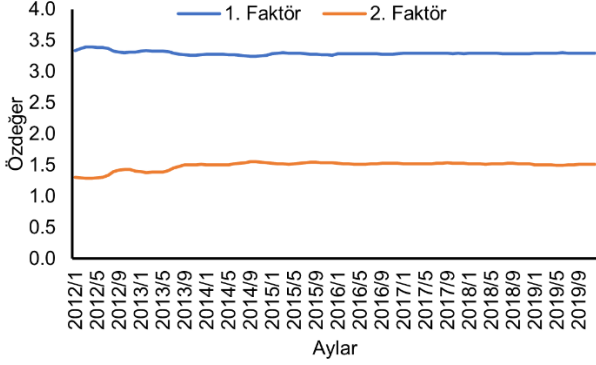


Şekil 4. Dinamik FA uygulaması sonucu faktörlerin toplam varyansı açıklama payları ve elde edilen KMO değerleri

Şekil 6 doğrultusunda genel olarak bütün parametrelerde olmak üzere ağırlıklı olarak Y parametresinin yük değerlerinin zamanla değişiminde belirgin bir simetri yapısı görülmektedir. Kullanılan parametrelerde 1. Faktörün etkisinin arttığı dönemlerde 2. Faktörün etkisi azalmış ve 1. Faktörün etkisinin azaldığı dönemlerde de 2. Faktörün etkisi artmıştır. Bu kapsamda analiz sonucunda elde edilen faktörlerin karakterlerinin oldukça baskın olduğu anlaşılmaktadır.

Yapılan çalışma sonucunda genel olarak kullanılan veri setini ağırlıklı olarak sıcaklık ve rüzgâr fenomenlerinin temsil ettiği görülmüştür. FA ile yapılan dinamik çözümlemede ise zamanla birlikte özellikle sıcaklık fenomeninin etkisinin artmış olduğu ve özellikle AYB parametresinin de bu değişime benzer bir davranış gösterdiği görülmektedir. Gerek **Şekil 3**'te özellikle kış sıcaklıklarında son yıllarda görülen artış, gerekse de **Şekil 6**'da S parametresinin 1. Faktör altında göstermiş olan sürekli artma trendi bu sonucu destekler niteliktedir. Buradan yola çıkarak mevcut çalışmada kullanılan bölgenin iklim değişikliğinden etkilenmekte olduğu ve sıcaklığın zamanla daha fazla etkisini göstermekte olduğu anlaşılmaktadır. Elde edilen sonuçlar AYB parametresi çerçevesinde değerlendirildiğinde ise AYB parametresinin sıcaklıkta görülen bu artış trendine cevap verdiği ve

zamanla giderek daha fazla sıcaklık etkisine girmeye devam ettiği anlaşılmaktadır.



Şekil 5. Dinamik FA uygulaması sonucu her bir adımda elde edilen ilk iki anabileşene ait özdeğerler

Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular RH parametresi bakımından değerlendirildiğinde ise Şekil 3'te görüldüğü gibi RH parametresinde belirgin artış trendi meydana gelmiş ve Şekil 6'da görüldüğü gibi RH parametresinin 2. Faktör altında aldığı yük değerleri giderek artmıştır. Diğer taraftan NN parametresinin de bu değişime cevap verdiği görülmektedir. NN parametresi Şekil 3'te görüldüğü gibi zamanla azalma eğilimine girmiş ve bölgede daha kuru bir hava varlığı oluşmaya başlamıştır. Gerek sıcaklık fenomenindeki gerekse de rüzgâr fenomenindeki artışın bu etkiyi meydana getirebileceği oldukça mümkün bir durumdur. Fakat NN parametresinin özellikle Şekil 6'da görüldüğü gibi 2. Faktörün etkisine giderek daha fazla girmesi bu değişimin daha çok rüzgâr fenomeninin etkisiyle meydana geldiğini göstermektedir.

Çalışma alanının da içinde bulunduğu Doğu Akdeniz bölgesi birçok farklı çalışmada iklim değişikliğinin yoğun olarak hissedildiği bir bölge olarak tanımlanmaktadır [10, 11]. Lionello ve Scarascia [15] yapmış oldukları bir çalışmada yaklaşık olarak 1980'li yıllardan sonra Akdeniz bölgesinin dünya ortalamasından daha fazla ısındığını ifade etmişlerdir. Diğer taraftan bu konuyla ilgili yapılan farklı birçok çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir [16, 17]. Diğer taraftan özellikle açık yüzey buharlaşmasının sıcaklık değişimlerinden etkilenmesi beklenen bir sonuç olmakla birlikte 21. yy. boyunca buharlaşma değerlerinin bu değişime cevap verdiği görülmüştür [18]. Bu kapsamda mevcut çalışma sonucunda sıcaklık ve buharlaşma olgularında gözlenen artış literatürdeki çalışmalarla paralellik arz etmekte olup mevcut çalışmada elde edilen bulguların iklim değişikliği kaynaklı olduğunu göstermektedir.

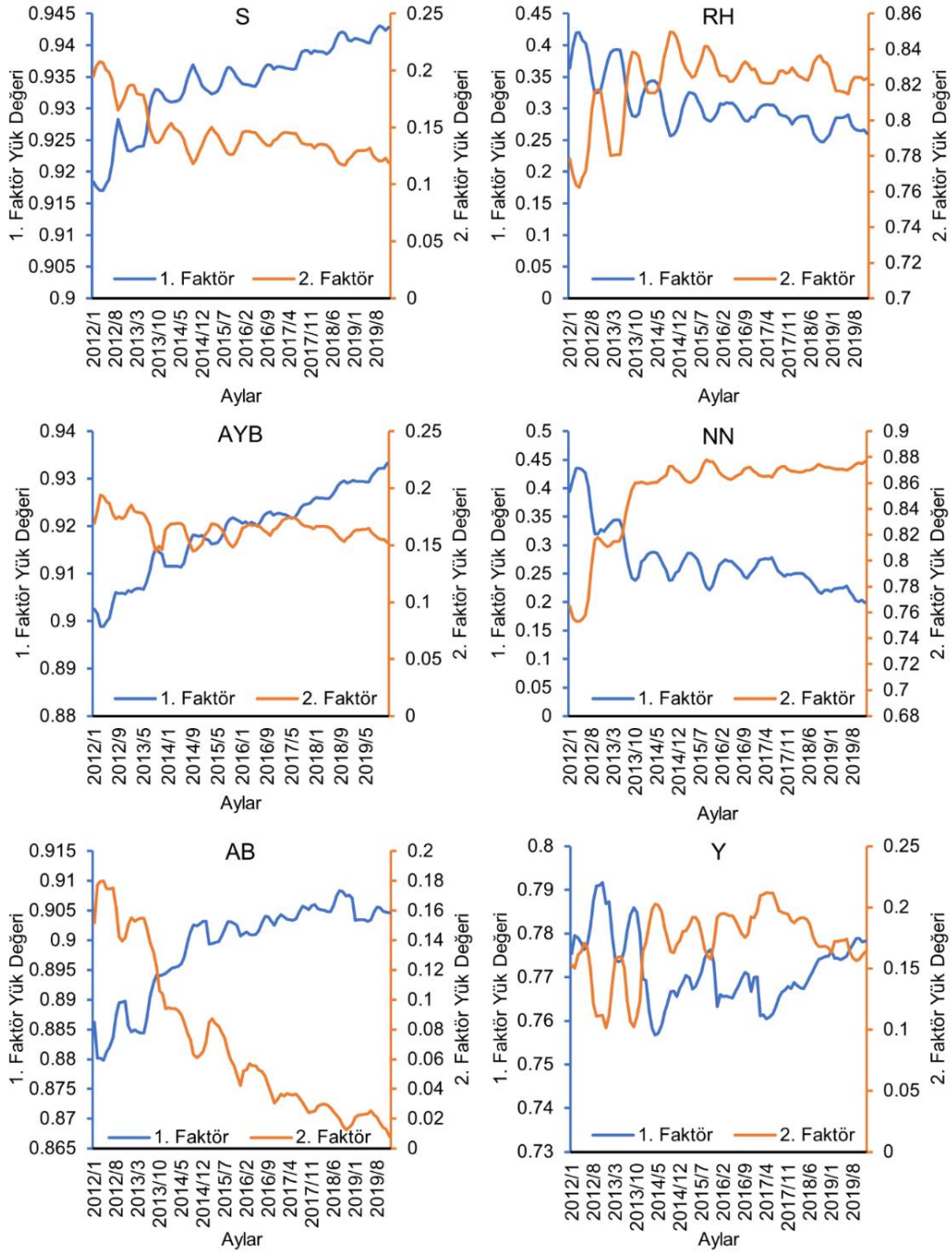
Çalışma sonucunda elde edilen bulgular rüzgâr fenomeni bakımından değerlendirilecek olursa; özellikle hava sıcaklığının artmasıyla birlikte basınç sistemlerinde meydana gelen değişikliklerden ötürü rüzgâr fenomeninde de mekansal ve zamansal anlamda değişikliklerin meydana gelmesi beklenebilir [19]. Yapılan farklı çalışmalarda iklim değişikliğinin rüzgâr üzerindeki etkisi incelenmiştir [20, 21]. Fakat gerçekleştirilen gelecek senaryolarında farklılıklar bulunmaktadır. Örnek olarak Martinez ve

Iglesias [22] yapmış oldukları çalışmada Akdeniz bölgesi için rüzgâr hızının gelecekte az miktarda artacağını ya da azalacağını ifade etmektedirler, diğer taraftan Moemken ve ark. [23] ise gelecek iklim senaryoları için Akdeniz bölgesinde rüzgâr etkisinde az miktarda azalma olacağını belirtmişlerdir. IPCC AR6'da ise Akdeniz bölgesi için ortalama rüzgâr hızlarında önemli bir artışın olmayacağı görülmektedir [12]. Bu doğrultuda rüzgâr fenomeni hakkında mevcut çalışmadan elde edilen çıktıların iklim değişikliği kaynaklı olduğu tam olarak söylenemez. Fakat Şekil 3'te görüldüğü gibi özellikle 2009 yılından sonra RH değerlerinde belirgin bir artış gözlenmiş bunun yanında Şekil 6'da görüldüğü gibi RH parametresi 2. Faktör altında zamanla daha fazla yük değerleri almıştır. Bu kapsamda rüzgâr fenomeninde görülen artışın kaynağı mikroklima/makroklima çerçevelerinde bölge özellikleri ile birlikte incelenerek farklı değerlendirmeler yapılabilir. Bu çıktı da gelecek çalışmalar için bir öneri kapsamında literatüre sunulmuştur.

Yapılan çalışmanın bir diğer çıktısı ise çalışma alanındaki bağıl nemin giderek azalması şeklinde ortaya çıkmıştır. Şekil 3 incelendiğinde özellikle son yıllarda NN parametresi belirgin bir azalma eğilimi göstermektedir. FA ile yapılan dinamik çözümleme sonucunda ise NN parametresinin 2. Faktördeki yük değerleri zamanla artmıştır. Dolayısıyla bölgedeki havanın giderek daha fazla kuru bir hal aldığı ve bölgedeki nem durumunun giderek azaldığı ifade edilebilir. Bu durum temelinde sıcaklık ve rüzgâr olmak üzere bölgede etkisini arttıran iki farklı fenomenin ortak bir sonucu olarak kabul edilebilir. Bu bakımdan kısmen de olsa iklim değişikliğinin bu noktada etkili olduğundan bahsetmek mümkündür. Özellikle IPCC AR6 incelendiğinde Akdeniz bölgesi için gelecekte daha kuru iklim şartlarının oluşacağı öngörülmektedir [12]. Dolayısıyla iklim değişikliği kapsamında daha kuru iklim koşulları Akdeniz bölgesi için beklenen bir durum olarak kabul edilebilir.

4 Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlara göre özellikle kuraklık, su kaynaklarının korunması ve orman yangınları çerçevelerinde önemli değerlendirmelerin yapılabilmesine imkân sağlamıştır. Öncelikli olarak çalışma alanında sıcaklığın baskın bir fenomen olduğu saptanmış ve bu fenomenin giderek etkisini arttırdığı gözlemlenmiştir. Diğer taraftan çalışma alanındaki bir diğer baskın olgunun rüzgâr etkisi olduğu ve yine bu etkinin de zaman içinde kuvvetlendiğine dair bulgulara ulaşılmıştır. Bu iki olgunun doğal bir sonucu olarak zaman içerisinde buharlaşma değerlerinde artışlar gözlemlenmiş olup bu artış özellikle su kaynaklarının korunması bakımından yüksek derecede önem arz etmektedir. Özellikle yüzeysel su kaynaklarından buharlaşma yoluyla yüksek miktarlarda su kaybı gerçekleşmesi sebebiyle gerekse de kuraklık mekanizmasında önemli bir yeri olması sebebiyle bölgedeki buharlaşma etkisinin artması su kaynaklarının korunması bakımından olumsuz bir çıktı olarak değerlendirilmiş olup bu durum bölgedeki su kaynaklarının daha verimli bir şekilde kullanılmasını bir gereklilik haline getirmektedir.



Şekil 6. Dinamik FA sonucunda parametrelerin yük değerlerinin zamanla değişimi

Giderek artan nüfusla birlikte meydana gelen aşırı üretim talebinin gelecek yıllarda da karşılanabilmesi için mutlaka iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkisi hassas bir şekilde analiz edilmelidir.

Diğer taraftan mevcut çalışmadan elde edilen bulgular orman yangınları bakımından önem arz etmektedir. Çalışma sonucunda bölgede sıcaklık ve rüzgâr etkisinin arttığı ve bunun yanında bölgedeki hava şartlarının daha kuru bir hal aldığı görülmüştür. Sayılan bu üç olguda direkt olarak orman yangınlarını tetikleyen unsurlar olup orman yangınları ile ilgili yapılan birçok hesaplamada kullanılan

temel parametrelerdir. Bu kapsamda Anamur gibi yüksek oranda ormanlık alana sahip bir bölge için elde edilen bu sonucun oldukça önemli olduğu düşünülmektedir.

Bahsedilen çıktıların elde edilebilmesi için kullanılan parametrelere FA dinamik bir şekilde uygulanmış olup bu yaklaşım tarzı mevcut çalışmanın orijinal ve yenilikçi kısmını oluşturmaktadır. Bu ve buna benzer diğer olguların karakterlerinin zamanla değişimi için ifade edilen yaklaşım tarzının önemli sonuçlar üretebileceği düşünülmektedir.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

- [1] O. Tamm, S. Maasikamäe, A. Padari and T. Tamm, Modelling the effects of land use and climate change on the water resources in the eastern Baltic Sea region using the SWAT model. *Catena*, 167,78–89, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.04.029>
- [2] H. Marhaento, M. J. Booij and A. Y. Hoekstra, Hydrological response to future land-use change and climate change in a tropical catchment. *Hydrol Sci. J.*, 63, (9), 2018.
- [3] B. Gül, Küresel iklim model verilerinin farklı yöntemlerle ayrıştırılması ve geleceğe yönelik yağış tahminlerinin yapılması. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12, (4), 1417-1425, 2023. <http://www.doi.org/10.28948/ngumuh.1314786>
- [4] M. Abbaszadeh, O. Bazrafshan, R. Mahdavi, E. R. Sardooi and S. Jamshidi, Modeling Future Hydrological Characteristics Based on Land Use/Land Cover and Climate Changes Using the SWAT Model. *Water Resources Management*, 1-18, 2023.
- [5] M. Ades, R. Adler, L. S. Aldeco and G. Alejandra, State of the climate in 2018. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100, 9, 2019.
- [6] L. V. Noto, G. Cipolla, A. Francipane and D. Pumo, Climate change in the mediterranean basin (part I): Induced alterations on climate forcings and hydrological processes. *Water Resources Management*, 37, (6-7), 2287-2305, 2023.
- [7] A. Kahaduwa and L. Rajapakse, Review of climate change impacts on reservoir hydrology and long-term basin-wide water resources management. *Building Research and Information*, 50 (5), 515-526, 2021.
- [8] C. Koycegiz and M. Buyukyildiz, Determination of change point and trend analysis of annual temperature data in Konya closed basin (Turkey). *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9 (1), 393-404, 2020. <http://www.doi.org/10.28948/ngumuh.598289>
- [9] U. Sadioğlu ve E. Ağıralan, İklim değişikliği çerçevesinde 25. taraflar konferansı (COP25). *Kafkas Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 11.Ek Sayı-1, 361-385, 2020.
- [10] G. Zittis, P. Hadjinicolaou, M. Klangidou, Y. Proestos and J. Lelieveld, A multi-model, multi-scenario, and multi-domain analysis of regional climate projections for the Mediterranean. *Regional Environmental Change*. 19(8), 2621–2635, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01565-w>
- [11] H. Douville, K. Raghavan, J. Renwick, R. P. Allan, P.A. Arias, M. Barlow, R. Cerezo-Mota, A. Cherchi, T. Gan, J. Gergis, V. Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to 45 the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. pp. 1055-1210, Cambridge University Press, UK, 2021.
- [12] E. Ali, W. Cramer, J. Carnicer, E. Georgopoulou, N. J. M. Hilmi, G. Le Cozannet and P. Lionello, 2022: Cross-Chapter Paper 4: Mediterranean Region. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H. O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2233–2272, 2022. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.021>
- [13] V. Yılmaz and M. Alpars. An Investigation of the Temporal Interaction of Urban Water Consumption in the Framework of Settlement Characteristics. *Water Resources Management*, 37 (4), 1619–1639, 2023. <https://doi.org/10.1007/S11269-023-03447-7/FIGURES/5>
- [14] C. P. Liang, T. C. Lin, H. Suk, C. H. Wang, C. W. Liu, T. W. Chang and J. S. Chen, Comprehensive assessment of the impact of land use and hydrogeological properties on the groundwater quality in Taiwan using factor and cluster analyses. *Sci. Total Environ.*, 851, 2022. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.158135>
- [15] P. Lionello and L. Scarascia, The relation of climate extremes with global warming in the Mediterranean region and its north versus south contrast. *Reg Environ Change* 20, 31, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01610-z>
- [16] A. Iglesias, L. Garrote, F. Flores and M. Moneo, Challenges to manage the risk of water scarcity and climate change in the Mediterranean. *Water Resources Management* 21(5):775–788, 2007. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9111-6>
- [17] García-Ruiz JM, López-Moreno JI, Vicente-Serrano SM, Lasanta-Martínez T, Beguería S (2011) Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth-Sci Rev* 105(3-4):121–139. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.006>
- [18] W. Wang, X. H. Lee, W. Xiao, S. D. Liu, N. Schultz, Y. W. Wang, M. Zhang and L. Zhao, Global lake evaporation accelerated by changes in surface energy allocation in a warmer climate. *Nat. Geosci.* 11 (6), 410–414, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0114-8>
- [19] D. Hdidouan and I. Staffell, The impact of climate change on the levelised cost of wind energy. *Renewable Energy*, 101, 575–592, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.09.003>
- [20] R. Golombek, S. A. C. Kittelsen and I. Haddeland, Climate change: Impacts on electricity markets in

- Western Europe. *Climatic Change*, 113 (2), 357–370, 2012. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0348-6>
- [21] L. Wenz, A. Levermann and M. Auffhammer, North-south polarization of European electricity consumption under future warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 144(38), E7910–E7918, 2017.
- [22] A. Martinez and G. Iglesias, Climate-change impacts on offshore wind resources in the Mediterranean Sea. *Energy Conversion and Management*, 291, 2023.
- [23] J. Moemken, M. Reyers, H. Feldmann and J. G. Pinto, Future changes of wind speed and wind energy potentials in EURO-CORDEX ensemble simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(12), 6373-6389, 2018.





Innovative frontiers: Advancing technologies for pesticide elimination in grape seeds

Üzüm çekirdeklerinde pestisit içeriğinin azaltılması için yenilikçi teknolojiler

Göksel Tırpancı Sivri^{1,*} 

¹ Tekirdağ Namık Kemal University, Faculty of Agriculture, Food Engineering Department, 59100, Tekirdağ, Türkiye

Abstract

Grape seeds, a valuable by-product of winemaking, are rich in bioactive compounds with significant economic potential. However, pesticide residues in grape seeds pose risks to human health and product quality. This study explores innovative technologies including cold plasma, ultrasound, aqueous ozone, and gaseous ozone to eliminate pesticide residues from grape seeds. Cold plasma treatment emerged as highly effective, completely eliminating certain pesticides like Triadimenol and Azoxystrobin. Ultrasound treatment also showed promising results, particularly in reducing Pyrimethanil residues. Aqueous ozone treatment achieved moderate reductions, while gaseous ozone exhibited the least efficacy. Factors influencing efficacy included pesticide type, treatment duration, and matrix characteristics. Future research should focus on optimizing parameters to enhance pesticide removal while minimizing impacts on product quality. These findings indicate the importance of tailored approaches for pesticide elimination, contributing to safer agricultural practices and consumer health.

Keywords: Grape seed, Pesticide elimination, Cold plasma, Ultrasound, Ozone treatment

1 Introduction

Grape pomace, a valuable by-product of winemaking, has gathered considerable attention due to the significance of its grape seeds, constituting about 25% of the pomace [1]. Beyond being a simple by-product, grape seeds hold remarkable economic potential, containing cellulose, oil, protein, and various bioactive compounds such as polyphenols [2]. This composition includes grape seeds as valuable resources for the development of nutraceuticals and cosmetics [3]. The multi-layered health benefits associated with grape seeds, including antioxidative, anti-inflammatory, anticancer, and neuroprotective properties, underscore their importance in promoting overall well-being [4,5].

Pesticides play a pivotal role in controlling pests and diseases in vineyards yet their improper use can lead to the exceeding of safe levels, posing threats to the environment, grape quality, processed products, and human health [6–8]. This concern is further emphasized by the fact that a significant percentage of tested grapes, over 86% according

Öz

Üzüm çekirdekleri, şarap üretimi sırasında ortaya çıkan değerli bir yan üründür ve biyoaktif bileşikler açısından zengin olmalarıyla dikkat çekerler. Ancak, bu çekirdeklerde bulunan pestisit kalıntıları, insan sağlığı ve ürün kalitesi açısından ciddi bir endişe kaynağıdır. Bu çalışma, üzüm çekirdeklerinden pestisit kalıntılarını azaltmak için soğuk plazma, ultrason, sulu ozon ve gaz ozon gibi yenilikçi teknolojileri araştırmaktadır. Yapılan deneylerde, özellikle soğuk plazma işleminin Triadimenol ve Azoksistrobin gibi belirli pestisitleri tamamen ortadan kaldırdığı gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, ultrason işlemi özellikle Pirimetanil kalıntılarını azaltmada etkili olmuştur. Sulu ozon ve gaz ozon işlemleri ise daha az etkili bulunmuştur. Bu bulgular, pestisitlerin ortadan kaldırılması için özelleştirilmiş yaklaşımların önemini vurgulayarak, daha güvenli tarımsal uygulamalara ve tüketici sağlığına katkıda bulunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Üzüm çekirdeği, Pestisit, Soğuk plazma, Ultrases, Ozon uygulamaları

to a recent European Union report, showed pesticide residues, with more than 68% having multiple residues [9]. The European Union has established maximum permitted pesticide levels in vegetable products, with grape residue limits typically ranging between 0.01 mg/kg and 5 mg/kg, depending on the specific pesticide [10].

The application of pesticides to grapevines prior to harvest tends to accumulate in grape seeds due to their high lipid solubility [11]. Furthermore, residues of pesticides present on the surface of grapes can transfer to the seeds throughout the processing stages for various products [12,13]. Specifically, in the production of cold-pressed grape seed oil, which involves traditional solvent extraction and refining processes without high-temperature treatments, elevated levels of pesticide residues may be observed [11]. Food producers involved in the industrial production of grape seed oil using the cold-press technique face a notable obstacle, as levels of pesticide residues may exceed the maximum residue limit (MRL). This issue becomes a critical concern, potentially endangering human health and

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: gtirpanci@nku.edu.tr (G. Tırpancı Sivri)
Geliş / Received: 26.02.2024 Kabul / Accepted: 26.03.2024 Yayınlanma / Published: 15.04.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1443273

complicating the preservation of essential nutrients during the cold-press process.

Traditional methods such as washing, chlorine-based chemical sanitization, and thermal processing are commonly used to remove pesticides from food. However, washing is only partially reliable for eliminating water-insoluble pesticides like hexachlorocyclohexane and endosulfan [14]. Moreover, the effectiveness of these methods varies based on factors such as residue location, polarity, time, and temperature [15,16]. Chemical sanitization, though effective, has raised concerns due to the potential generation of carcinogenic by-products, leading to its prohibition in some regions [17]. Although rigorous thermal treatments can guarantee products free of pesticides, they have the potential to negatively affect the physicochemical, nutritive, and organoleptic properties [18]. As an alternative, researchers are exploring non-thermal advanced oxidation methods for removing pesticide residues from agricultural products. Recent advancements in non-thermal and novel techniques, such as ozone, ultrasounds and cold plasma, have shown promise in modifying the negative impacts of pesticides in food [19–22].

In this investigation, grape seeds were obtained from grapes treated with pesticides, including Azoxystrobin, Triadimenol, Boscalid, Tetrahydrophthalimide, Fluopyram, Cyprodinil, Metalaxyl and isomer mix and Pyrimethanil. Significantly, the analysis shows that the pesticide content exceeds the established maximum residual limits (MRL) within the grape seeds. To eliminate these residues, innovative technologies such as cold plasma, ozone, and ultrasound were employed.

2 Materials and methods

The material for this study comprises Misket grape seeds sourced by a local company (İstanbul, Türkiye) which produces grape seed powder and oil. In this study, the samples analyzed are naturally contaminated products determined to be pesticide-laden through quality control analyses conducted during the routine purchasing process of the company that uses grape seeds as raw material. All chemicals used for analyses were purchased from Sigma-Aldrich (St Louis, MO).

2.1 Emerging technologies applied

In this study, various innovative technologies were employed as methods to eliminate pesticide residues from grape seeds. These included cold plasma, ultrasound, aqueous ozone, and gaseous ozone treatments.

2.1.1 Cold plasma application

The experimental setup for this study involved the utilization of an Atmospheric Cold Plasma Jet. Specifically, the plasma jet utilized in the research was the Plasmatek A5 with a power capacity of 600W. The cold plasma operated at a frequency of 40 kHz, and a power input of 600W was employed during the experimental procedures. Additionally, dry air was supplied at a controlled rate of 10 L/min to facilitate the atmospheric cold plasma jet application. The 5 gr of grape seed samples were weighed in a petri dish and placed under the jet outlet. The treatment time was

determined as 15 min which was tested highest treatment time for food products in the literature.

2.1.2 Ultrasound application

The ultrasound treatment was administered using the Bandelin HD4100 Ultrasonic Homogenizer, paired with the TS106 probe for enhanced precision. To commence the procedure, the 50 grams of seed samples were suspended in water at a ratio of 5/100 (w/v). The ultrasonication process involved pulsing at intervals of 10 seconds on and 5 seconds off, conducted at room temperature for a duration of 15 minutes while maintaining a precise 75% amplitude (20 kHz, ultrasonic power ranging from 30 to 150 W). Following the ultrasonication process, the seed samples underwent a careful filtration step and were subsequently subjected to air-drying to complete the process. This method ensures the effective application of ultrasound for decrease of pesticide residues in the treatment of seed samples.

2.1.3 Aquas ozone application

Aquas ozone was generated by a custom-made ozone generator (PCS Electronics, İstanbul, Turkey). The ozone was generated at a controlled flow rate of 2 L/min, ensuring a stable and efficient production with at least 2 ppm concentration. Subsequently, a total of 100 grams of seed were immersed in this ozone-enriched solution, maintained at room temperature. The immersion duration was set as 30 minutes allowing for the exploration of the impact of ozone exposure on the seeds.

2.1.4 Gaseous ozone application

The experimental setup for the application of gaseous ozone comprised an oxygen concentrator, an ozone generator, a fumigation chamber, and an ozone destructor. The gaseous ozone generator is integrated with an oxygen concentrator to enhance the ozone concentration. The ozone generation system, utilizing an oxygen concentrator, achieved a purity level of 95% through the swing adsorption principle, effectively separating oxygen, nitrogen, and other gases at a constant temperature. To produce gaseous ozone, a corona discharge ozone generator from PCS Electronics in İstanbul was employed. Operating with a power consumption of 500 W and utilizing purified dry oxygen feed gas, this ozone generator yielded an output of 10 g/h. This comprehensive system ensures the controlled and efficient generation of gaseous ozone for various applications. The 100 grams of seed samples were exposed to gaseous ozone for 30 min in the chamber and then kept in a sealed bag for pesticide analysis.

2.2 Pesticide analysis

2.2.1 Pesticide extraction

In the preparation process for LC-MS/MS analysis, the grape seed samples were ground with the help of a grinder. The QuEChERS (quick, easy, cheap, effective, rugged, and safe) method was employed one-step buffered acetonitrile (MeCN) extraction, incorporating salting-out liquid-liquid partitioning with MgSO to remove water from the sample. For this, 10 g of the homogenized samples were carefully transferred into a 50 mL centrifuge tube. To validate the

process, recovery studies were conducted by introducing specific volumes of the working standard solution into blank samples, followed by the addition of 20 mL of ACN. The tube underwent a vigorous 3-minute vortex, and a well-defined phase separation was achieved by introducing 3 g of NaCl. Following immediate capping, the tubes underwent an additional 2-minute vortex and were then centrifuged for 5 min at 3800 rpm. The upper layer, amounting to 1 mL, was precisely transferred to a 2 mL centrifuge tube. After a 1-minute vortex and a subsequent 1-minute centrifugation at 10,000 rpm, the resulting upper layer was subjected to filtration through a membrane with a pore size of 0.22 µm. Finally, the filtered content was transferred into an auto-sampler vial, ready for LC-MS/MS analysis.

2.2.2 Chromatographic analysis

AOAC Official Method 2007.01 was used to analyze the pesticide residues on grape seed samples with some modifications. The concentration of pesticides was determined using the LC-MS/MS system (Agilent), which featured an ESI source. Chromatographic separation was achieved employing a C18 column (15 cm long, 3.0 mm id, 3µm particle size) with a flow rate of 0.3 mL/min, and the injection volume was set to 10µL. The gradient elution with an initial condition of 25% MeOH in 5 mM formic acid solution was taken linearly in 15 min to 90% MeOH in 5 mM formic acid solution and held for 15 min [23].

3 Results and discussion

The seed samples were naturally contaminated with 8 different pesticides which were Pyrimethanil, Metalaxyl and isomer mix, Cyprodinil, Fluopyram, Tetrahydrophthalimide, Boscalid, Triadimenol and Azoxystrobin. The concentration of the pesticides was indicated in Table 1. These pesticides were determined over the maximum residual limit which is stated in the Turkish Food Codex.

Table 1. The pesticide levels of naturally contaminated grape seeds

Pesticide	Concentration (mg/kg)	MRL* (mg/kg)
Pyrimethanil	0.28±0.01	0.020
Metalaxyl and isomer mix	0.21±0.004	0.010
Cyprodinil	0.13±0.005	0.020
Fluopyram	0.066±0.001	0.010
Tetrahydrophthalimide	0.056±0.002	0.050
Boscalid	0.043±0.001	0.010
Azoxystrobin	0.024±0.001	0.010

*MRL (maximum residue level as stated in the Turkish Codex)

In this study, emerging methods to eliminate pesticides were evaluated specifically focusing on Pyrimethanil, Metalaxyl and its isomer mix, Cyprodinil, Fluopyram, Tetrahydrophthalimide, Boscalid, Triadimenol, and Azoxystrobin, all of which were found to exceed the Maximum Residue Limits (MRLs).

Cold plasma treatment is one of the promising techniques to eliminate or reduce pesticide residues on food products [24]. Jet air cold plasma treatment involves the use of non-thermal plasma to eliminate pesticide residues on the surface

of fruits and vegetables. In this study jet air cold plasma applied to grape seed samples resulted in a significant amount of elimination in the aforementioned pesticides as shown in Figure 1. Triadimenol and Azoxystrobin were completely eliminated by cold plasma treatment, while Tetrahydrophthalimide exhibited a moderate level of resistance, with a reduction rate of 59%. Azoxystrobin's numerous functional groups make it vulnerable to attack by active chemical species resulting from cold plasma. Photodegradation likely occurs through multiple pathways, including photo-isomerization, hydrolysis, and cleavage of various bonds [25]. Additionally, Boscalid demonstrated the second highest resistance, with a reduction rate of 65%. Similar results were observed for the dissipation efficacy of boscalid and imidacloprid on blueberries by plasma treatment. A two-minute plasma treatment achieved removal efficiencies surpassing 20% across all applied voltages. Notably, after five minutes at 80 kV, removal efficiencies for boscalid and imidacloprid reached 75% and 80%, respectively [26]. In another study conducted by Misra et al. [27], applied cold plasma treatment to strawberries contaminated with a mixture of pesticides, achieving maximum reductions of 69%, 45%, 71%, and 46% for azoxystrobin, cyprodinil, fludioxonil, and pyriproxyfen, respectively, after 300 s of treatment at 80 kV. Except for pyriproxyfen, all other pesticides reached concentrations below the permitted MRL following plasma treatment. Since the cold plasma treatment was applied for 15 min in this study, all pesticides were determined under the MRL. The longer the treatment time, the more elimination rate was achieved [28]. These findings emphasize the variability in pesticide susceptibility to cold plasma treatment, highlighting the need for further research to better understand resistance mechanisms and treatment effectiveness.

Ultrasound treatments, an eco-friendly technology in the food industry, are utilized for pesticide decontamination, as indicated by Bhargava et al. [29]. In this study, ultrasound treatment demonstrated the highest effectiveness in dissipating pesticides as seen in Figure 1. Similarly, cold plasma treatment successfully eliminated Triadimenol and Azoxystrobin, with Pyrimethanil also completely removed from the grape seed samples. Boscalid exhibited greater resistance to ultrasound treatment compared to cold plasma treatment, achieving only a 58% elimination rate. This suggests that while ultrasound can effectively reduce the concentration of Boscalid, it may not be as efficient as cold plasma treatment in eliminating this particular pesticide. Ultrasonication was observed to effectively remove pesticide residues from food products through reactive oxygen and cavitation processes. However, it was noted that certain pesticides, such as Boscalid, exhibited higher resistance to ultrasonication compared to cold plasma treatment. The findings align with previous research, such as that performed by Cengiz et al. [30] and Lozowicka et al. [31]. Cengiz et al. have demonstrated the efficacy of low-intensity electric current and ultrasound in reducing pesticide levels in tomatoes, while Lozowicka et al. found the ultrasonic treatment to be particularly effective in removing pesticide

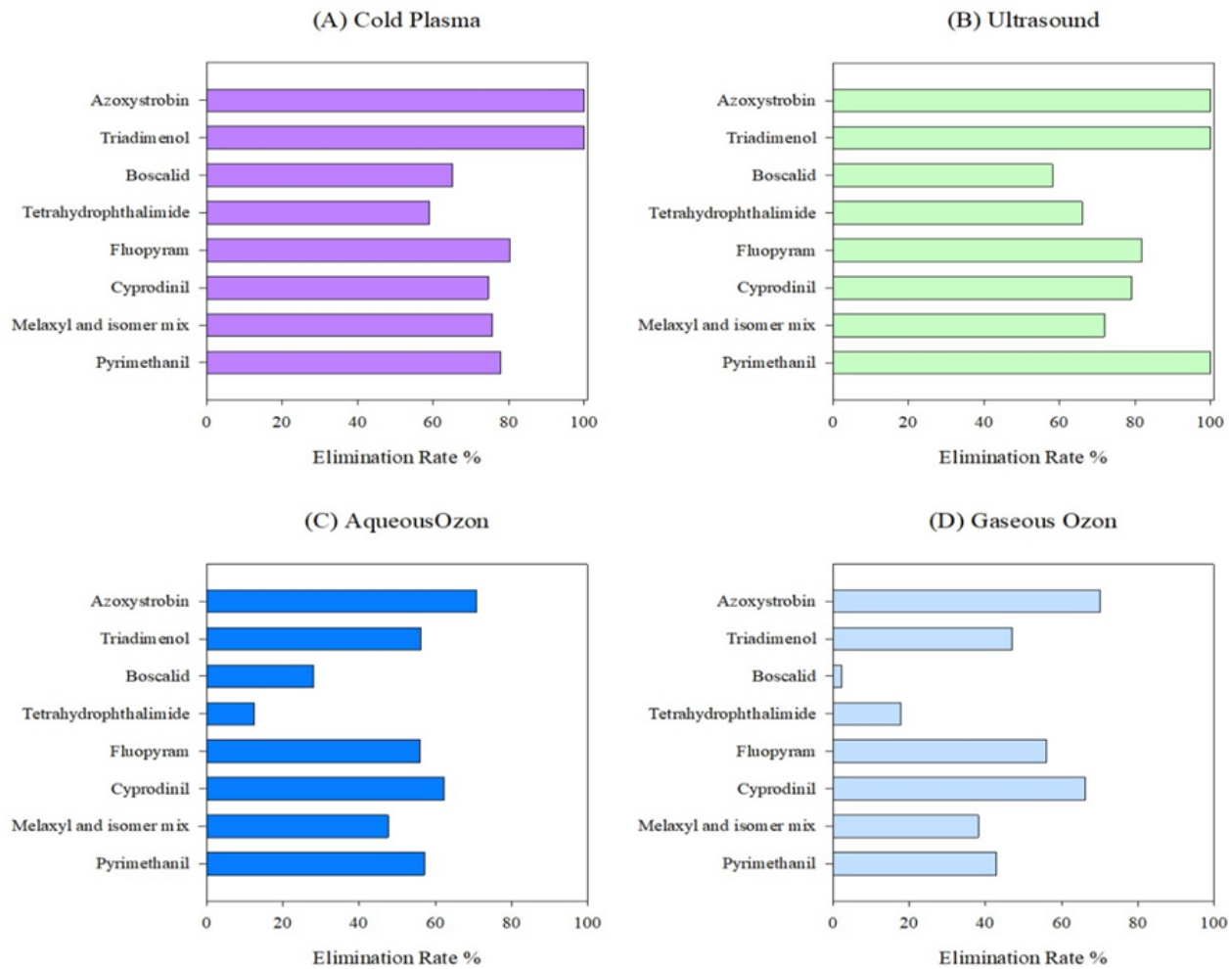


Figure 1. Elimination rate of pesticide, determined grape seed by different emerging technologies including (A) Cold Plasma, (B) Ultrasound treatments, (C) Aqueous Ozon and (D) Gaseous Ozon

residues from strawberries. Furthermore, Zhou et al. [32] investigated the efficacy of sole ultrasonic washing on the dissipation of various pesticides in rape and grapes, using a commercial ultrasonic dishwasher. Their study highlighted the considerable impact of surface characteristics on dissipation efficiency, noting higher reductions in grape samples due to their increased surface area. Similarly, [33] examined the influence of ultrasonic washing on pesticide residues in pakchoi. They observed that increasing ultrasonic power and decreasing frequency enhanced pesticide reduction, albeit at the expense of the vegetable's vitamin C content and physical integrity. The effectiveness of ultrasound treatment in pesticide dissipation is influenced by factors such as the commodity's surface area, treatment conditions (ultrasonic power and frequency), and pesticide resistance. Optimizing these parameters is crucial for maximizing treatment efficiency and effectively managing pesticide residues in agricultural products.

Aqueous ozone treatment offers an economically feasible and efficient method for reducing pesticides from food products. Since ozone undergoes degradation into harmless oxygen, making it environmentally friendly, is commonly

used during fruit and vegetable processes [34]. The treatment with ozonated water resulted in the reduction of pesticide residues, including Pyrimethanil, Cyprodinil, Fluopyram, Triadimenol, and Azoxystrobin, by 57%, 62%, 56%, 56%, and 70% respectively. However, unlike cold plasma and ultrasound treatments, the complete elimination of any pesticide on grape seeds was not achieved. Moreover, Tetrahydrophthalimide showed the greatest resistance to aqueous ozone treatment in this study, with the lowest 12% elimination rate observed. In contrast, Al-Dabbas et al. [35] reported substantial reductions of 98% in chlorpyrifos and 87% in cypermethrin levels in tomato fruits after washing with ozonated water containing 0.4 ppm ozone for 30 minutes.

In a study conducted by Rodrigues et al. [36] two ozone treatments, bubbling ozone in water at concentrations of 1 and 3 mg/L, effectively removed residues of the fungicides azoxystrobin, chlorothalonil, and difenoconazole in tomatoes, with the 3 mg/L treatment achieving the highest reduction of 70–90% of the pesticides. Another study examined the use of low levels of dissolved ozone (1.4–2.0 mg/L) to eliminate residues of four pesticides (methyl-

parathion, parathion, diazinon and cypermethrin) on Brassica rapa vegetable surfaces. Notably, ozone exhibited considerable effectiveness in removing cypermethrin, with removal rates exceeding 60% [37]. Furthermore, the efficiency of pesticide removal was found to be closely linked to the levels of dissolved ozone and temperature. The efficacy of ozone treatment is depending on several factors, including concentration, temperature and application duration, as evidenced in this study. Consequently, the complete elimination of the expected pesticides was not achieved in these tested conditions for our study, emphasizing the importance of selecting parameters to achieve broad dissipation while minimizing adverse effects on product quality.

In the conducted study, it was found that the application of gas ozone exhibited the least efficacy relative to other treatments under investigation. It was observed that Boscalid exhibited the minimum reduction among the tested pesticides when exposed to gas ozone. This indicates the highest degree of resistance among all tested pesticides. This result seems to be consistent with other research which found storage in the gaseous ozone did not accelerate the decline of boscalid residues on table grapes [38]. Although none of the pesticides used in the study were completely eliminated by gas ozone, noteworthy reductions were evident. Specifically, Azoxystrobin demonstrated the most significant decrease at 70 %, followed closely by Cyprodinil at 66 %. These results suggest that while gas ozone shows promise as a pest control agent, its effectiveness varies depending on the specific pesticide being targeted. The fact that Boscalid exhibited the least reduction emphasizes the variability in susceptibility among different pesticides to gas ozone treatment. A study conducted to remove difenoconazole and linuron from carrots reported that as ozone concentration and treatment duration increased, the percentages of pesticide removal also increased [39].

In another study showed by Kusvuran and colleagues, on lemon, orange, and grapefruit, they highlighted the significant impact of the matrices on the efficacy of gas ozone application. They observed that the removal efficiency of pesticide residues with ozone was notably influenced by the structural properties of the pesticides as well as the characteristics of the matrices [40]. The diminished efficacy of gaseous ozone in eliminating pesticides could be attributed to the matrices effect, particularly evident in grape seeds due to their smaller surface area and thicker coating. This limited contact with ozone gas could explain the reduced effectiveness observed in pesticide elimination. It is clear that achieving optimal results necessitates a nuanced understanding of the specific characteristics of the target residues and matrices involved.

4 Conclusion

This study aimed to evaluate various emerging technologies for removing pesticide residues from naturally contaminated grape seeds. While specific conditions are known to be necessary for effective treatment, this research underscores the importance of considering the type of pesticide involved due to variations in resistance levels.

Among the tested methods, cold plasma application emerged as the most powerful, demonstrating remarkable efficacy in pesticide elimination. Ultrasound treatment also proved successful in significantly reducing pesticide residues. Although ozone treatments exhibited comparatively lower efficacy, both applications achieved a moderate level of pesticide elimination. These findings highlight the complexity of pesticide removal processes and emphasize the necessity of tailored approaches based on pesticide type and food matrices. Further research in this area could lead to the development of more efficient and targeted pesticide removal strategies, benefiting agricultural practices and consumer safety.

Acknowledgment

I would like to express my gratitude to Prof. Dr. Ümit Geçgel and Prof. Dr. Ahmet Şükrü Demirci for their invaluable contributions in providing materials and their unwavering support throughout this research study.

Conflict of interest

The author declares that no conflicts of interest exist regarding the research and content of this study.

Similarity rate (iThenticate): 11%

References

- [1] N. Göktürk Baydar, G. Özkan and E.S. Çetin, Characterization of grape seed and pomace oil extracts, *Grasas y Aceites*, 58, 29–33, 2007. <https://doi.org/10.3989/gya.2007.v58.i1.5>.
- [2] R. Sirohi, A. Tarafdar, S. Singh, T. Negi, V.K. Gaur, E. Gnansounou and B. Bharathiraja, Green processing and biotechnological potential of grape pomace: Current trends and opportunities for sustainable biorefinery, *Bioresource Technology*, 314, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123771>.
- [3] M. Oliveira and E. Duarte, Integrated approach to winery waste: waste generation and data consolidation, *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 10, 168–176, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11783-014-0693-6>.
- [4] I.R. Da Mata, S.M. Dal Bosco and J. Garavaglia, Different biological activities (antimicrobial, antitumoral, and antioxidant activities) of grape seed oil, in: *Multiple Biological Activities of Unconventional Seed Oils*, Academic Press, Elsevier, 215–227, 2022. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824135-6.00029-5>.
- [5] C. Rodríguez-Pérez, B. García-Villanova, E. Guerra-Hernández and V. Verardo, Grape seeds proanthocyanidins: An overview of in vivo bioactivity in animal models, *Nutrients*, 11, 2019. <https://doi.org/10.3390/nu11102435>.
- [6] Food and Agriculture Organization, *Pesticides Use, The US*, 2022.
- [7] C.S. Jacobsen and M.H. Hjelmsø, Agricultural soils, pesticides and microbial diversity, *Current Opinion in Biotechnology*, 27, 15–20, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2013.09.003>.

- [8] N. Kumar, A.K. Pathera, P. Saini and M. Kumar, Harmful effects of pesticides on human health, *Annals of Agri-Bio Research*, 17(2), 125–127, 2012.
- [9] G. Bellisai, G. Bernasconi, L.C. Cabrera, I. Castellan, M. del Aguila, L. Ferreira, G.G. Santonja, L. Greco, S. Jarrah, R. Leuschner, J.M. Perez, I. Miron, S. Nave, R. Pedersen, H. Reich, S. Ruocco, M. Santos, A.P. Scarlato, A. Theobald, M. Tiramani and A. Verani, Modification of the existing maximum residue levels for pyrimethanil in table grapes, garlic and honey, *EFSA Journal*, 21, 2023. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.8195>.
- [10] C. of the E.U. European Parliament, Regulation (EC) No 396/2005 of the European Parliament and of the Council of 23 February 2005 on maximum residue levels of pesticides in or on food and feed of plant and animal origin and amending Council Directive 91/414/EEC Text with EEA relevance, *Official Journal of the European Union*, 70, 2005.
- [11] G. Rose, S. Lane and R. Jordan, The fate of fungicide and insecticide residues in Australian wine grape by-products following field application, *Food Chemistry*, 117, 634–640, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.04.061>.
- [12] D.T. Likas and N.G. Tsiropoulos, Fate of three insect growth regulators (IGR) insecticides (flufenoxuron, lufenuron and tebufenozide) in grapes following field application and through the wine-making process, *Food Additives and Contaminants - Part A*, 28, 189–197, 2011. <https://doi.org/10.1080/19440049.2010.542184>.
- [13] P. Cabras and A. Angioni, Pesticide residues in grapes, wine, and their processing products, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48, 967–973, 2000. <https://doi.org/10.1021/jf990727a>.
- [14] Ma.L. Ortiz-Hernández, M.L. Castrejón-Godínez, E.C. Popoca-Ursino, F.R. Cervantes-Dacasa and M. Fernández-López, Strategies for Biodegradation and Bioremediation of Pesticides in the Environment, in: M. Fuentes, V. Colin, J. Saez (Eds.), *Strategies for Bioremediation of Organic and Inorganic Pollutants*, CRC Press, 87–100, 2018.
- [15] T. Djordjevic and R. Djurovic-Pejcev, Food processing as a means for pesticide residue dissipation, *Pesticidi i Fitomedicina*, 31, 89–105, 2016. <https://doi.org/10.2298/pif1604089d>.
- [16] U. Bajwa and K.S. Sandhu, Effect of handling and processing on pesticide residues in food- A review, *J Food Science Technology*, 51, 201–220, 2014. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0499-5>.
- [17] K.T.K. Phan, H.T. Phan, D. Boonyawan, P. Intipunya, C.S. Brennan, J.M. Regenstien and Y. Phimolsiripol, Non-thermal plasma for elimination of pesticide residues in mango, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 48, 164–171, 2018. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2018.06.009>.
- [18] N.S. Heo, M.K. Lee, G.W. Kim, S.J. Lee, J.Y. Park and T.J. Park, Microbial inactivation and pesticide removal by remote exposure of atmospheric air plasma in confined environments, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 117, 81–85, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2013.06.007>.
- [19] S. Wang, J. Wang, T. Wang, C. Li and Z. Wu, Effects of ozone treatment on pesticide residues in food: A review, *International Journal of Food Science & Technology*, 54(2), 301–312, 2019. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13938>.
- [20] W. Wang, Z. Gao, C. Qiao, F. Liu and Q. Peng, Residue analysis and removal of procymidone in cucumber after field application, *Food Control*, 128, 108168, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108168>.
- [21] X.D. Fan, W.L. Zhang, H.Y. Xiao, T.Q. Qiu and J.G. Jiang, Effects of ultrasound combined with ozone on the degradation of organophosphorus pesticide residues on lettuce, *RSC Advances*, 5, 45622–45630, 2015. <https://doi.org/10.1039/C5RA03024B>.
- [22] M. Gavahian, C. Sarangapani and N.N. Misra, Cold plasma for mitigating agrochemical and pesticide residue in food and water: Similarities with ozone and ultraviolet technologies, *Food Research International*, 141, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110138>.
- [23] AOAC, AOAC Official Method 2007.01 Pesticide Residues in Foods by Acetonitrile Extraction and Partitioning with Magnesium Sulfate Gas Chromatography/Mass Spectrometry and Liquid Chromatography/Tandem Mass Spectrometry First Action, 2007.
- [24] P. Sojithamporn, K. Leksakul, C. Sawangrat, N. Charoenchai and D. Boonyawan, Degradation of Pesticide Residues in Water, Soil, and Food Products via Cold Plasma Technology, *Foods*, 12, 2023. <https://doi.org/10.3390/foods12244386>.
- [25] E.T. Rodrigues, I. Lopes and M.Â. Pardal, Occurrence, fate and effects of azoxystrobin in aquatic ecosystems: A review, *Environment International*, 53, 18–28, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2012.12.005>.
- [26] C. Sarangapani, G. O'Toole, P.J. Cullen and P. Bourke, Atmospheric cold plasma dissipation efficiency of agrochemicals on blueberries, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 44, 235–241, 2017. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2017.02.012>.
- [27] N.N. Misra, S.K. Pankaj, T. Walsh, F. O'Regan, P. Bourke and P.J. Cullen, In-package nonthermal plasma degradation of pesticides on fresh produce, *Journal of Hazardous Materials*, 271, 33–40, 2014. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2014.02.005>.
- [28] S.A. Mir, B.N. Dar, M.M. Mir, S.A. Sofi, A. Shah, T. Sidiq, K.V. Sunooj, A.M. Hamdani and A.M. Khaneghah, Current strategies for the reduction of pesticide residues in food products, *Journal of Food Composition and Analysis*, 106, 104274, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104274>.
- [29] N. Bhargava, R.S. Mor, K. Kumar and V. Singh Sharanagat, Advances in application of ultrasound in food processing: A review, *Ultrasonics Sonochemistry*, 70, 105293, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105293>.

- [30] M.F. Cengiz, M. Başlar, O. Basançelebi and M. Kılıçlı, Reduction of pesticide residues from tomatoes by low intensity electrical current and ultrasound applications, *Food Chemistry*, 267, 60–66, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.08.031>.
- [31] B. Lozowicka, M. Jankowska, I. Hrynko and P. Kaczynski, Removal of 16 pesticide residues from strawberries by washing with tap and ozone water, ultrasonic cleaning and boiling, *Environmental Monitoring and Assessment*, 188, 1–19, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4850-6>.
- [32] Q. Zhou, Y. Bian, Q. Peng *, F. Liu, W. Wang and F. Chen, The effects and mechanism of using ultrasonic dishwasher to remove five pesticides from rape and grape, *Food Chemistry*, 298, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125007>.
- [33] Y. Zhu, T. Zhang, D. Xu, S. Wang, Y. Yuan, S. He and Y. Cao, The removal of pesticide residues from pakchoi (*Brassica rape L. ssp. chinensis*) by ultrasonic treatment, *Food Control*, 95, 176–180, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.07.039>.
- [34] Z.B. Guzel-Seydim, A.K. Greene and A.C. Seydim, Use of ozone in the food industry, *LWT*, 37, 453–460, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2003.10.014>.
- [35] M.M. Al-Dabbas, A.A. Shaderma, T.M. Al-Antary, H.A. Ghazzawi and H.J. Hamad, Effect of Ozonation on Cypermethrin and Chlorpyrifos Pesticides Residues Degradation in Tomato Fruits, *Fresenius Environmental Bulletin*, 27, 6628–6633, 2018.
- [36] A.A.Z. Rodrigues, M.E.R.L. De Queiroz, A.A. Neves, A.F. De Oliveira, L. Henrique, F. Prates, J. Faêda De Freitas, F. Fernandes Heleno, L. Rita D' and A. Faroni, Use of ozone and detergent for removal of pesticides and improving storage quality of tomato, *Food Research International*, 125, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108626>.
- [37] J. Wu, T. Luan, C. Lan, T. Wai, H. Lo, G. Yuk and S. Chan, Removal of residual pesticides on vegetable using ozonated water, *Food Control*, 18, 466–472, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2005.12.011>.
- [38] H. Karaca, S.S. Walse and J.L. Smilanick, Effect of continuous 0.3µL/L gaseous ozone exposure on fungicide residues on table grape berries, *Postharvest Biology and Technology*, 64, 154–159, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.07.004>.
- [39] L. Pellanda De Souza, L. Rita D', A. Faroni, F. Fernandes Heleno, F.G. Pinto, M.E. Lopes, R. De Queiroz, L. Henrique and F. Prates, Ozone treatment for pesticide removal from carrots: Optimization by response surface methodology, *Food Chemistry*, 243, 435–441, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.09.134>.
- [40] E. Kusvuran, D. Yildirim, F. Mavruk and M. Ceyhan, Removal of chloropyrifos ethyl, tetradifon and chlorothalonil pesticide residues from citrus by using ozone, *Journal of Hazardous Materials*, 287–300, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.09.043>.





Türkiye kömür rezervlerinin rasyonel değerlendirilmesi ve ekonomik önemi

Rational evaluation of the coal reserves of Turkey and their economic importance

Mahmut Suat Delibalta^{1,*} 

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

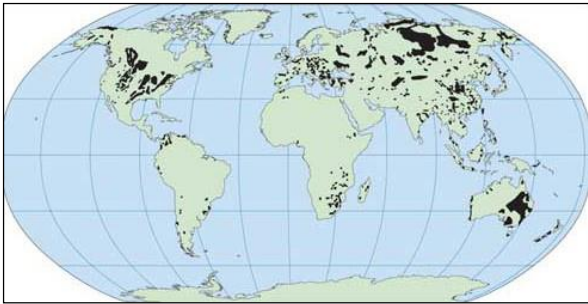
Öz

Kömür ve maden yatakları milyonlarca yılda oluşan, tüketildiğinde kısa zamanda tekrar yerine konulamayan tabii kaynaklardır. Türkiye 1.52 milyar ton taşkömürü 19.32 milyar ton linyit ve asfaltit olmak üzere toplam 20,84 milyar ton kömür rezervine sahiptir. Ülkemizde 2022 yılı içinde 105.37 milyon ton tüvenan kömür üretilmiş, 119.80 milyon ton kömür tüketilmiştir. Yerli kömür kaynakların yaklaşık %11 pay aldığı termik santral kurulu gücümüz, toplam kurulu gücün %21'ini oluşturmaktadır. Enerji temininde %75 oranında yurtdışına bağımlı olan ülkemiz, enerji hammaddeleri ithalatına yıllık ortalama 45 milyar dolar ödemektedir. Bu durum, dış ödemeler dengesinde ülkemize büyük bir ekonomik yük getirmektedir. Ülkelerin kalkınmışlık düzeyleri ile tabii kaynak potansiyelleri ilişkisine bakıldığında, gelişmiş toplumların maden rezervleri bakımından kısmen zengin, bu kaynakları da doğru ve etkin bir biçimde kullandıkları görülmektedir. Bu maksatla araştırmada, Türkiye kömür rezervlerinin daha rasyonel, havza (entegre) madencilik yöntemleriyle değerlendirilmesi ve ekonomik önemi çok boyutlu olarak incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Madenler, Kömür, Havza, Verimlilik, İş güvenliği

1 Giriş

Toplumların sosyo-ekonomik gelişim sürecinde önemli unsurlardan biri de sürdürülebilir enerji ve tabii kaynaklara sahip olmalarıdır. Son yıllarda enerji arz güvenliğini temin etmek amacıyla ülkelerin alternatif kaynaklara yönelmesi [1], özellikle dünyada çok yaygın bulunan kömür rezervlerine ilgiyi arttırmaktadır (Şekil 1).



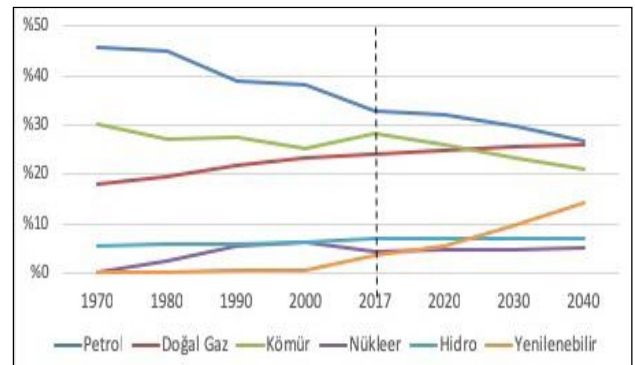
Şekil 1. Dünya kömür rezervleri lokasyonu [2]

Abstract

Coal and mineral deposits are natural resources that have been formed over millions of years that cannot be replaced and renewed in a short time when consumed. Turkey has 1.52 billion tons of hard coal, 19.32 billion tons of lignite and asphaltite, a total of 20.84 billion tons of coal reserves. In our country, 105.37 million tons of coal was produced and 119.80 million tons of coal was consumed in 2022. The installed capacity of the Turkish thermal power plant, of which domestic coal resources account for about 11%, accounts for 21% of the total installed capacity. Our country, which is dependent on abroad for 75% of energy supply, pays an average of 45 billion dollars annually to the import of energy raw materials. This situation imposes a great economic burden on the external balance of payments to Turkey. When we look at the relationship between the development levels of countries and their natural resource potentials, it is seen that developed societies are partially rich in mineral reserves and use these resources correctly and effectively. For this purpose, the evaluation of Turkey's coal reserves with more rational, basin (integrated) mining methods and their economic importance were examined in a multidimensional way in the research.

Keywords: Mines, Coal, Basin, Productivity, Occupational safety

Tüm dünya ülkeleri enerji talebinin yaklaşık %80'i petrol, doğal gaz ve kömürden, %15'i yenilenebilir, %5'i de nükleer ve diğer kaynaklardan karşılanmaktadır (Şekil 2).



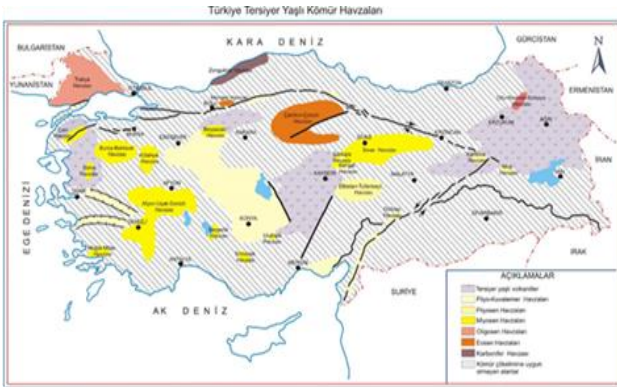
Şekil 2. Global enerji talebinin kaynaklara göre % dağılımı [2]

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: (msdelibalta@ohu.edu.tr)

Geliş / Received: 15.11.2023 Kabul / Accepted: 19.02.2024 Yayınlanma / Published: 15.04.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1391184

Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin artan enerji hammadde talepleri, küresel piyasalarda çok ciddi rekabete neden olmaktadır [3, 4]. Bu sebeple enerji temininde birçok ülke, stratejik ve güvenilir bir çözüm yöntemi olarak kendi ulusal kaynaklarına yönelmektedir. Doğal kaynakların yapısal özellikleriyle ilişkili çevresel ve antropojen etkilerin bir arada oluşturduğu, makro-mikro ölçekte diğer ekosistemler ile etkileşimde bulunan jeomorfolojik, hidrolojik ve topoğrafik bölgelere havza denilmektedir [5, 6, 7]. Gerek jeoloji gerekse madencilik alanında da havza kavramı benzer manada kullanılmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Jeolojik oluşumlarına göre Türkiye kömür havzaları [8]

2 Materyal ve metod

Havza madenciliği, belirli bir coğrafi bölgede bulunan cevher ve kömür rezervlerinin entegre biçimde işletilmesi yöntemidir. Bir maden yatağı veya kömür havzası oluşum koşulları, o bölgedeki maden arama, değerlendirme ve işletme yöntemlerini büyük ölçüde etkilemektedir. Bu sebeple ülkemiz önemli kömür havzaları; maden mevzuatı, işgücü verimliliği, rezerv ve iş güvenliği boyutları çerçevesinde istatistiksel analizler yapılarak incelenmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

Kömür ve maden yatakları; ülkelerin sosyo-ekonomik gelişmesinde aktif rol alan, endüstriye hammadde sağlayan, yeni sanayi tesislerinin kurulmasına ve istihdama yol açan tabii kaynaklardır. Madenlerin bir diğer önemli özelliği de, doğada nadir bulunan ve kullanıldığında tükenen/yenilenmeyen rezervler olmalarıdır. Bu nedenle; milyonlarca yıl ve olağanüstü jeolojik koşullarda oluşan madenlerin üretim ve tüketiminde maksimum faydanın ön planda tutulması mesleki bir gerekliliktir.

3.1 Maden mevzuatı boyutu

Anayasanın 168. maddesi gereğince, tabii kaynaklar devletin hüküm ve tasarrufu altındadır. Bunların aranması ve işletilmesi hakkı devlete aittir. Devlet bu hakkını belirli bir süre için, gerçek ve tüzel kişilere devredebilir. Ayrıca, Türkiye'de yürürlükte olan maden kanunu ve yönetmelikleri entegre (havza) madenciliğine imkân tanımaktadır [9-11]. Fakat gerek mali gerekse politik nedenlerden dolayı, kömür sahalarının işletilmesinde bu hususları pratikte görmek pek mümkün değildir. Öyle ki; aynı kömür havzasında farklı

firma ve rödevans uygulamalarının varlığı, bunun bir kanıtı niteliğindedir [12]. Burada temel sorun; kömür sahalarının özelleştirilmesi veya rödevans olarak verilmesi değil, üretim ve çalışma verimliliğini azaltan çok fazla kısmi küçük yapıların oluşmasıdır.

İlgili birimlerce gerekli tüm kanuni düzenlemelerin eşgüdüm halinde yapıldığı, Maden Bölgesi Kanun Maddesi'nin ilk uygulama projesi olan "Sürdürülebilir Agregat Madenciliği" güvenli, çevre ile barışık, rezervlerin optimum değerlendirildiği iyi/örnek bir havza madenciliği çalışması olmuştur (Şekil 4). Aynı üretim modeli, ulusal kömür rezervlerimizin bütüncül bir yapı ve etkin değerlendirilmesi için de uygulanabilir.

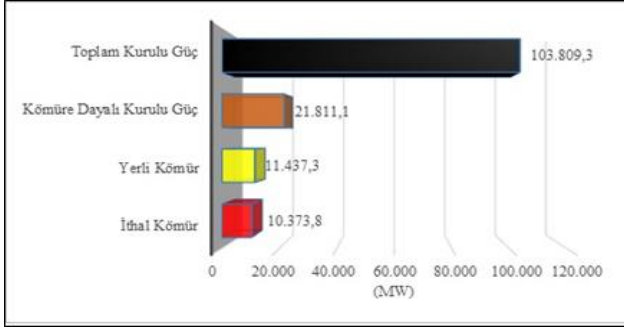


Şekil 4. Cebeci maden bölgesi nihai tesis modeli [13]

3.2 Kömür madenciliği ve ekonomi boyutu

Kömür; dünya elektrik üretiminde %35.9 pay ile birinci, primer enerji tüketiminde petrolden sonra %26.9 pay ile ikinci sırada yer almaktadır [14]. Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü (MAPEG) ve Enerdata 2022 yılı verilerine göre; dünyada toplam 8.17 milyar ton kömür üretimi 7.86 milyar ton kömür tüketimi gerçekleşmiştir. Ülkemizde ise aynı yıl toplam 105.37 milyon ton tüvenan kömür üretilmiş, 119.80 milyon ton kömür tüketilmiştir. Bu tüketimin %60.2'i taşkömürü, %83.5'i linyit ve asfaltit olarak termik santrallerde kullanılmıştır. Geri kalan miktarlar ise; ısınma, demir-çelik ve diğer sanayi dallarına tevzi edilmiştir. Söz konusu veri ve göstergelerden de anlaşıldığı üzere, ülkemiz enerji kaynakları temininde (petrol, doğalgaz ve taşkömürü) yaklaşık %75 oranında yurtdışına bağımlıdır. Bu durum, pek çok politik ve ekonomik riskleri de beraberinde getirmektedir. Ülkemiz enerji hammaddeleri ithalatına yıllık ortalama 45 milyar dolar ödemektedir. Bu sebeple; "Milli Enerji ve Maden Politikası" çerçevesinde, kömür rezervlerimizin daha aktif kullanımı teşvik edilmektedir.

Yapımı devam eden tesisler hariç ülkemizde; 1 asfaltit, 46 linyit, 4 taşkömürü ve 16 ithal kömüre dayalı toplam 67 adet elektrik üretim (termik) santrali bulunmaktadır. Türkiye termik santral kurulu gücü, toplam kurulu gücün %21'ine tekabül etmektedir. Yerli kömür ile çalışan santrallerin kurulu gücü ise, toplam kurulu gücün sadece %11'i civarındadır (Şekil 5).

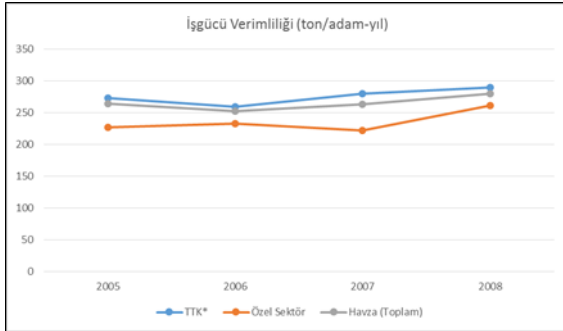


Şekil 5. Türkiye termik santral kurulu gücü [14]

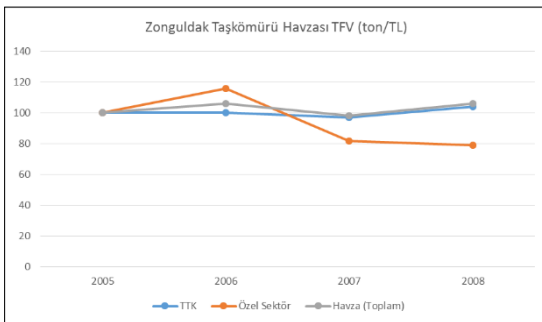
Ülkemiz enerji arz güvenliğini temin etmek amacıyla, ithal kömüre dayalı santrallerin yerine yerli kömür ile çalışan santraller teşvik edilmektedir. Böylece; enerji sektöründe ithalatın azaltılması, aynı zamanda öz kaynaklarımızın ülke ekonomisine olumlu katkılar sunması beklenmektedir.

3.3 İşgücü verimlilik analizi boyutu

Madencilik faaliyetlerinde işçilik maliyetlerinin önemli pay alması nedeniyle, işletmelerde emek (işgücü) ve sermaye verimliliğine azami özen gösterilmektedir. Maden işletmelerinde verimlilik, çıktı/girdi (output/input) oranıyla kısaca ton/yevmiye olarak ölçülmektedir. Türkiye kömür işletmeleri verimlilik oranı (1.500 ton/yıl), ABD (12.700 ton/yıl) ve Avustralya (10.100 ton/yıl) gibi gelişmiş ekonomiler ile kıyaslandığında çok düşük seviyededir [15]. Benzer düşük değerleri, Zonguldak taşkömürü havzası özelinde yapılan işgücü verimlilik analiz sonuçlarında da görmekteyiz (Şekil 6-7).

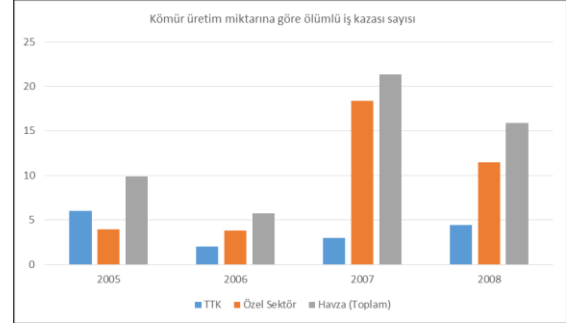


Şekil 6. Zonguldak taşkömürü havzası işgücü verimliliği [16]



Şekil 7. Zonguldak taşkömürü havzası TFV endeksi [16]

İşgücü verimliliği, Toplam Faktör Verimliliği (TFV) endeksi ve ölümlü iş kazası verileri dikkate alındığında, rödevans uygulamasının havzada kayda değer bir iyileşme sağlamadığı görülmektedir (Şekil 8).



Şekil 8. Üretilen taşkömürü miktarına göre ölümlü iş kazası sayısı [17]

Kömür havzalarında verimli olmayan çalışma koşulları, gerek taşkömürü gerekse linyit madenciliğinin ülkemiz ekonomisine sunacağı katma değeri de azaltmaktadır [15-19]. Bu nedenle; kömür rezervlerimizin daha rasyonel değerlendirilmesi için, çağdaş ve entegre bir madencilik üretim modelinin tesis edilmesi gerekmektedir.

3.4 Rezerv ve iş güvenliği boyutu

Kömür madenciliğinde sıkça yaşanan ölümlü iş kazaları, başta sektörde çalışanlar olmak üzere toplumun tüm kesimini olumsuz yönde etkilemektedir. Özellikle maden mühendisi ve işçilerin moral ve motivasyonları azalmakta, işletme verimliliği düşmektedir. Kömür işletmelerinde verimliliğin azalması, hem yönetsel hem de mali performansı etkilemektedir. Yaklaşık 120 km²'lik alanı kapsayan, Kışlaköy (A), Çöllolar (B) ve Afşin (C) üç ana sektör ile D, E ve F alt sektörlerden oluşan Afşin-Elbistan linyit havzasını irdelediğimizde; gerek kömür rezervi gerekse iş güvenliği bakımından önemli dezavantajlar barındırdığı görülmektedir (Şekil 9).



Şekil 9. Afşin linyit havzası ve termik santraller [20]

Mevcut açık işletme kömür üretim ve iş güvenliği planına göre, sektörler arasında emniyet topuğu bırakılması gerekmektedir. Buna göre; komşu iki sektör alt-üst sınırında bırakılacak topuklar nedeniyle, yaklaşık 650 milyon ton kömür kaybı oluşmaktadır (Şekil 10). Bu üretim projelerine göre; rezervin önemli bir kısmı bırakılan topuklar nedeniyle

alınmamakta, kalan rezervler de 6 ayı sektöre bölünmüş olduğundan kömür kazı miktarı iyice düşmektedir.

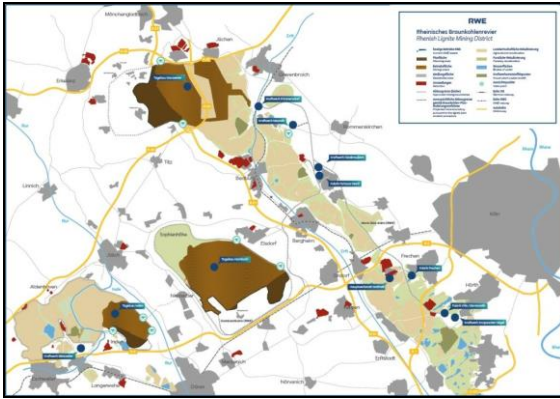


Şekil 10. Sektörler arası kömür topuğu kesit görünüşü [20]

Ayrıca; Çöllolar kömür sahasında 2011 yılı meydana gelen şev heyelanı [21], Soma ve Ermenek kömür havzalarında 2014 yılı yaşanan grizu ve su patlaması nedeniyle, büyük maddi ve can kayıplarının olduğu iş kazaları meydana gelmiştir. Yukarıda belirtilen gerek mali ve gerekse işgücü kayıpları dikkate alındığında, kömür rezervlerinin birden fazla sektör/rödevans halindeki üretim faaliyetleri mutlaka yeniden tasarlanmalıdır.

3.5 Uluslararası ve strateji boyutu

Tüm dünya ülkeleri için kömür rezervleri vazgeçilmez ve önemli bir enerji kaynağıdır. Ülkelerin enerji üretiminde kullandıkları kömür miktarı payı incelendiğinde, Polonya %83 ile birinci, Avustralya %61 ile ikinci, Türkiye ise İngiltere ile birlikte %30 ile 10. sırada yer almaktadır [22]. Ancak; gelişmiş ülkelerde kömür madenciliği faaliyetleri teknolojiye dayalı, sermaye yoğun ve yüksek nitelikli işgücü ile yapılırken (Şekil 11), gelişmekte olan veya az gelişmiş ülkelerde yoğun emek ve kalifiye olmayan personel ile sürdürülmektedir.



Şekil 11. Garzweiler, Hambach ve Inden (Almanya) linyit açık işletmelerinden görünüş [23]

Almanya'nın Ren (Aachen, Köln, Mönchengladbach) bölgesi linyit havzasında kömür üretimi 18.yüzyılda başlamış, günümüzde de modern ekipmanlar ile devam etmektedir. 30 milyar tonu ekonomik işletilebilir olmak üzere toplam 55 milyar ton linyit rezervine sahip bölgede, kömür üretim faaliyetleri 2030 yılında sona erecektir. Bu tür uzun vadeli ve entegre maden tesis planlamaları, yerli kömür rezervlerimizin değerlendirilmesine de rol model olabilir.

Ayrıca; Avrupa Birliği'nin yeni stratejisi olan "Avrupa Yeşil Mutabakatı (European Green Deal)" yeşil ve döngüsel bir ekonomi için temiz, ulaşılabilir ve güvenli enerji sağlayacak politikalara önem vermektedir [24, 25]. Ülkemiz enerji sektöründe de söz konusu mutabakat strateji ve hedefleri etkili olmaktadır. Bu nedenle, son yıllarda tüm dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı artırılmakta ve yeşil yatırımlar teşvik edilmektedir. Böylece, ülkelerin enerji politikaları yeşil, ekonomik ve güvenli enerji arzı olarak şekillenmektedir.

Ülkemiz cari bütçe açığında önemli bir yer tutan enerji hammaddeleri ithalatı nedeniyle hem ekonomik hem de enerji arz güvenliği bakımından kömür rezervlerimizin kritik önemi bir kez daha ortaya çıkmaktadır. Madencilik sektörü yüksek kaza riski içeren, bilgi, tecrübe ve sermaye gerektiren ağır bir iş koludur. Bu nedenle; bilgi ve tecrübe sahibi gerek özel gerekse kamu kurumlarının varlığı ve gelişimi, ulusal kalkınmamızın sürdürülebilirliği bakımından oldukça önemlidir.

4 Sonuçlar

Ulusal ve uluslararası enerji sektöründe yaşanan yüksek talep artışları ve bunun yarattığı çevresel sorunlar, ülkeleri yeni ve yenilenebilir/alternatif kaynak arayışlarına yönlendirmektedir. Özellikle tabii kaynakları ve enerji hammaddeleri yetersiz olan ülkeler için bu durum, yüksek dış ödemeler ve finansman güçlüğü yaratmaktadır. Bu nedenle; pek çok ülke enerji ithalatı giderlerini azaltmak amacıyla, önceliği kendi tabii kaynaklarına vermektedir.

Havza madenciliği, belirli bir coğrafi bölgede bulunan cevher ve kömür rezervlerinin entegre biçimde işletilmesi yöntemidir. Bu süreçte mutlaka; ilgili yasal mevzuatları, çevresel standartları, iş sağlığı ve güvenliği önlemlerini dikkate almak gerekmektedir. Ülkemiz kömür rezervlerinin havza madenciliği yöntemiyle işletilmesinin sağlayacağı avantajlar;

- Maden rezerv kayıplarının önlenmesi,
- Enerji arz güvenliğinin sağlanması,
- İş kazaları ve risklerin azaltılması,
- İşgücü ve toplam faktör verimliliğinin artması,
- Mesleki tecrübe ve uzmanlığın artması,
- Yüksek katma değer ve kazanç sağlamak,
- Bütçe açığı ve döviz giderlerini azaltmak,
- Uzun vadeli maden planlama ve işletmelerinin tesis edilmesidir.

Üluların sosyo-ekonomik kalkınması için, yalnızca zengin tabii kaynaklara sahip olması yeterli değildir. Tabii kaynakların yanı sıra yeterli sermaye, teknolojik altyapı, kalifiye işgücü, serbest ve güçlü ekonomi politikalarına da ihtiyaç vardır. Bu nedenle, ülkemizin enerji sektöründe yurtdışına olan bağımlılığını azaltmak için; havza madenciliğine ve yerli kömür ile çalışan modern termik santrallere öncelik vermesi, kaynak çeşitliliği ve işgücü verimliliğini artırması gerekmektedir.

Çıkar çatışması

Yazar, herhangi bir kişi veya kurum ile çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %14

Kaynaklar

- [1] M.S. Delibalta, Türkiye’de fosil enerji kaynakları ve yeni nesil termik santrallerin önemi. Uluslararası Enerji, Ekonomi ve Güvenlik Kongresi-ENSCON’18, sayfa 22-34, Kozyatağı/ İstanbul, Türkiye, 21-22 Nisan 2018.
- [2] İ. Kavaz, Yerli ve milli enerji politikaları ekseninde kömür. SETA Analiz, Siyaset, Ekonomi ve Toplum Araştırmaları Vakfı, Ankara, Sayı 265, s 32, Ocak 2019.
- [3] K. Başol, M. Durman ve M.Y. Çelik, Kalkınma sürecinin lokomotif; doğal kaynaklar. Muğla Üniversitesi SBE Dergisi, 14, 61-71, 2005.
- [4] TMMOB, Madencilik sektörü ve politikaları raporu, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını, Ankara, 47, 2011.
- [5] İ. Seyhan. Doğal kaynakların havza madenciliği ve entegre tesisler ile değerlendirilmesinin madencilik rejimine etkisi. MTA Enstitüsü, 13, 47-59, 1972.
- [6] A. Öğretmen. Ereğli kömür madeni havzasında ilk üretim. AÜ Türkiyat Araştırmaları Enstitüsü Dergisi-TAED, 31, 135-160, 2006.
- [7] U.F. Küçükali ve S. Atabay, Havzaların fiziki planlamasına ekolojik yaklaşım. Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi, 6(1), 180-183, 2013.
- [8] MTA, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Hizmetler-Enerji haritaları, <https://www.mta.gov.tr/v3.0/hizmetler/jeotermal-harita>, Erişim tarihi: 16 Mart 2020.
- [9] RG-Resmi Gazete, Maden Sahaları İhale Yönetmeliği, Yönetmelik, Sayı: 30187, 7, Ankara, 21 Eylül 2017.
- [10] RG-Resmi Gazete, Maden Bölgelerine ve Ruhsatların Taşınmasına İlişkin Yönetmelik”, Yönetmelik, Sayı: 30429, 9, Ankara, 23 Mayıs 2018.
- [11] TMMOB, Maden Kanunu ve Uygulama Yönetmelikleri, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını, 288, Ankara, 2010.
- [12] MAPEG. Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü (MAPEG), Maden Yönetmelikleri, Maden Sahaları İhale Yönetmeliği, <https://www.mapeg.gov.tr/Sayfa/Ozellestirilmis/maden-yonetmelikleri>, Erişim tarihi: 27 Ekim 2023.
- [13] M. Sever ve A. Tuğrul. Maden bölgeleri yönetmeliği ve maden bölgeleri kurulumu ile ilgili ilk uygulama: Cebeci maden bölgesi projesi. MAPEG Maden ve İnsan Bülteni, 2(4), 22-33, 2019.
- [14] ETKB. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB), Tabii kaynaklar, kömür, Bilgi Merkezi, Ankara. <https://enerji.gov.tr/bilgimerkezi-tabii-kaynaklar-komur>, Erişim tarihi: 27 Ekim 2023.
- [15] M.S. Delibalta, Türkiye madencilik sektöründe verimlilik ve ekonomik katkı analizi, MCBÜ Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi, 35(1), 16-26, 2023. <https://doi.org/10.47118/somatbd.1198426>.
- [16] H. Aydın ve G. Önsoy, Zonguldak taşkömürü havzası kömür işletmelerinde verimlilik analizi. Madencilik, 50(1), 33-41, 2011.
- [17] TBB. Soma maden faciası benzeri kazaların önlenmesine yönelik sistem ve temel mevzuat önerileri hakkında rapor. Türkiye Barolar Birliği (TBB) Yayınları: 288, 136, Ankara, 2015.
- [18] G. İlçe, Zonguldak havzası ve üç boyutlu yeraltı maden üretim modellemesi. TMD Sektörden Haberler Bülteni, İstanbul, 70-76, 2015.
- [19] M. Yörükoğlu, Afşin-Elbistan projesi ve TKİ Kurumu AELİ Müessesesinde madencilik çalışmaları. Madencilik, 30(3), 13-29, 1991.
- [20] Ç. Koçak, N. Tamzok ve S. Yılmaz, Afşin-Elbistan linyit rezervlerinin elektrik üretimi bakımından değeri ve izlenmesi gereken politikalar. Türkiye 11. Enerji Kongresi, İzmir, sayfa 30, 21-23 Ekim 2009.
- [21] M.S. Delibalta, O. Günaydın ve T. Koçak, Dinamik yükler etkisinde oluşan açık işletme şev heyelanları ve alınacak iş güvenliği önlemlerinin tespiti. Maden İşletmelerinde İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu’2011, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını, sayfa 107-115, Zonguldak, 24-25 Kasım 2011.
- [22] T.C. Kalkınma Bakanlığı (KB), On birinci kalkınma planı (2019-2023), Madencilik Politikaları, Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Ankara, 243, 2018.
- [23] DEBRIV – Deutscher Braunkohlen-Industrie-Verein e.V. | 09/2023, Tagebaue, Berlin, 6. <https://braunkohle.de/braunkohle-indeutschland/unter-nehmen/> Erişim tarihi: 27 Ekim 2023.
- [24] F. Yılmaz, Enerji yönetimi ve Türkiye: Avrupa yeşil mutabakatı çerçevesinde bir değerlendirme. Akademia Doğa ve İnsan Bilimleri Dergisi, 8(1), 19-37, 2022.
- [25] G. Küçük ve B. Yüce Dural. Avrupa yeşil mutabakatı ve yeşil ekonomiye geçiş: Enerji senaryoları üzerinden bir değerlendirme. Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 22 (1), 137-156, 2022. <https://doi.org/10.18037/ausbd.1095137>.

